

Schalltechnischer Bericht der erweiterten Hauptuntersuchung

zur messtechnischen Ermittlung der
Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von
hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und
Vergleich der Messergebnisse mit
Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2

Auftraggeber	LANUV NRW Wallneyer Straße 6 45133 Essen
Forschungsvorhaben	Nr. 14 1446 11-2 vom 11.11.2014
Verfasser	B. Eng. Justus Engelen Dipl.-Ing. Peter Wenzel
Umfang	Textteil 64 Seiten Anhang 60 Seiten
Ausfertigung	als PDF-Dokument

Inhalt Textteil

Zusammenfassung	7
1 Grundlagen	8
2 Veranlassung und Aufgabenstellung	11
2.1 Grundlegende Rahmenbedingungen	13
2.2 Beschreibung des Untersuchungsstandortes	14
2.3 Beschreibung der Windenergieanlagen	15
2.4 Voruntersuchung, Hauptuntersuchung und erweiterte Hauptuntersuchung	16
2.4.1 Differenzierung des Untersuchungsumfangs	16
2.4.2 Ergebnisse der Voruntersuchung	17
2.4.3 Ergebnisse der Hauptuntersuchung	18
2.4.4 Beschreibung der erweiterten Hauptuntersuchung	20
3 Durchführung der erweiterten Hauptuntersuchung	21
3.1 Messbedingungen	21
3.2 Beschreibung der eingerichteten Messpunkte	22
3.2.1 Messpunkte der Emissionsmessungen in der 2-Quellen-Konfiguration	22
3.2.2 Messpunkte der Immissionsmessungen	23
3.2.3 Geräuschcharakteristik im Bereich der Messpunkte	24
3.3 Eingesetzte Messtechnik	25
3.4 Dokumentierte Messgrößen und Anlagenparameter	28
4 Auswertung der Messungen	29
4.1 Emissionsmessungen in Anlehnung an DIN EN 61400-11	29
4.1.1 A-bewerteter Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten	29
4.1.2 Immissionsrelevante Schalleistungspegel	30
4.2 Immissionsmessungen gemäß DIN 45645-1	33
4.3 Meteorologische Messungen mittels SODAR-RASS	36
4.4 Messunsicherheiten	37
4.4.1 Emissionsmessungen in Anlehnung an die DIN EN 61400-11	37
4.4.2 Immissionsmessungen gemäß DIN 45645-1	38
5 Ausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2	39
5.1 Grundlagen	39
5.2 Berechnungsverfahren	40
5.2.1 Allgemeines Berechnungsverfahren	40
5.2.2 Alternatives Verfahren zur Berechnung A-bewerteter Schalldruckpegel	40
5.3 Qualität der Prognose	41
5.4 Eingangsdaten	42
5.5 Ergebnisse der Ausbreitungsberechnungen und Vergleich	43
6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	46
6.1 Vergleich der messtechnischen und rechnerischen Ergebnisse	46
6.1.1 Grundlegendes	46
6.1.2 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.2)	47
6.1.3 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=1)	49
6.1.4 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=0)	51
6.1.5 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.2, A _{gr} =0)	53
6.2 Diskussion der Ergebnisse	55
7 Ausblick zur Verbesserung der Prognosequalität	57

Inhalt Anhang

- A** Dokumentation der Emissionsmessungen
- B** Dokumentation der Immissionsmessungen
- C** Dokumentation der Schallausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2
- D** Grafische Dokumentation der SODAR-RASS-Messungen
- E** Digitale Dokumentation
- F** Lagepläne

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Standort Messdurchführung (ohne Maßstab)	14
Abbildung 2	Grafik zur Konfiguration der Immissionsmessung (ohne Maßstab)	23
Abbildung 3	Schalldruckpegel am Referenzmesspunkt EMP2 (südl. WEA, 1. Messnacht)	30
Abbildung 4	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2 berechneten Schalldruckpegel	47
Abbildung 5	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen	48
Abbildung 6	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=1 berechneten Schalldruckpegel	49
Abbildung 7	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=1 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen	50
Abbildung 8	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel	51
Abbildung 9	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen	52
Abbildung 10	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel	53
Abbildung 11	Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen	54
Abbildung 12	Differenzen der Schalldruckpegel (Mitwindbereich)	58
Abbildung 13	Einzelbetrachtung: Differenz der Messwerte/Frequenzselektive Berechnung mit G=0 im Mitwindbereich	59
Abbildung 14	Differenzen der Schalldruckpegel (Gegenwindbereich)	60
Abbildung 15	Einzelbetrachtung: Differenz der Messwerte/Frequenzselektive Berechnung mit G=0 im Gegenwindbereich	61
Abbildung 16:	Richtcharakteristiken von hohen WEA in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [31]	62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Beschreibung der Windenergieanlagen	15
Tabelle 2	Differenzierung: Voruntersuchung und Hauptuntersuchung	16
Tabelle 3	Vergleich der berechneten und messtechnisch erhobenen Immissionspegel	17
Tabelle 4	Auswertung Hauptuntersuchung 2012	18
Tabelle 5	Messbedingungen	21
Tabelle 6	Messpositionen der Emissionsmessungen	22
Tabelle 7	Konfiguration Immissionsmessung	24
Tabelle 8	Messgeräteleiste	25
Tabelle 9	Akustische und nicht-akustische Messgrößen und Anlagenparameter	28
Tabelle 10	Abstände R_1 , Emissionsmessungen WEA 1 und WEA 2	31
Tabelle 11	Immissionsrelevante Schalleistungspegel der untersuchten Windenergieanlagen	32
Tabelle 12	Oktavspektrum der Schalleistungspegel	32
Tabelle 13	Ergebnisse der berechneten Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A) an den Immissionsmesspunkten	35
Tabelle 14	Wettersituation erweiterte Hauptuntersuchung 2013 [18]	36
Tabelle 15	Geschätzte Genauigkeit DIN ISO 9613-2	41
Tabelle 16	Eingangsdaten zum rechnerischen Vergleich der Schallausbreitung (erweiterte Hauptuntersuchung 2013)	42
Tabelle 17	Eingangsdaten zum rechnerischen Vergleich der Schallausbreitung (Hauptuntersuchung 2012)	42
Tabelle 18	Berechnete Immissionspegel an den Immissionsmesspunkten	43
Tabelle 19	Übersicht Auswertung	46
Tabelle 20	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2	47
Tabelle 21	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2, Datensätze verworfen	48
Tabelle 22	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $G=1$	49
Tabelle 23	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $G=1$, Datensätze verworfen	50
Tabelle 24	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $G=0$	51
Tabelle 25	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $G=0$, Datensätze verworfen	52
Tabelle 26	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2, $A_{gr}=0$	53
Tabelle 27	Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $A_{gr}=0$, Datensätze verworfen	54
Tabelle 28	Diskussion der Ergebnisse (Mitwind- und Gegenwindrichtung)	55
Tabelle 29	Diskussion der Ergebnisse (in 750 m Entfernung, winkelabhängig)	56

Verwendete Formelzeichen

A_{gr}	dB	Bodendämpfung
A_{div}	dB	die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung (hier: teils bezogen auf WEA1 und WEA2)
α	°	Winkel zwischen der Vertikalen und der Windrichtung am Messtag
β_{WS}	m	Bereich für die Anordnung der Windsensoren
d, d_m	m	(mittlerer) Abstand zwischen den Emissionsquellen und Immissionsmesspunkten
D	m	Rotordurchmesser
D_{Fl-TM}	m	Abstand des Rotorflanschmittelpunktes von der Turmmittellinie
D_{konst}	dB	Ausbreitungskonstante/Dämpfungskonstante
D_t	m	Turmdurchmesser am Fußpunkt
Δh	m	Höhendifferenz zwischen Mikrofon und Turmfußpunkt
G	-	der Bodenfaktor gemäß DIN ISO 9613-2
H	m	vertikaler Abstand des Rotormittelpunktes vom Boden (Nabenhöhe)
κ		Verhältnis der normierten zur gemessenen Windgeschwindigkeit
$L_{Aeq,c,k}$	dB(A)	der unter Referenzbedingungen gemessene, bezüglich des Fremdgeräusches korrigierte, A-be-wertete Schalldruckpegel bei den ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten
$L_{Aeq,AG,IMP}$	dB(A)	der Anlagengeräuschpegel am Immissionsmesspunkt (= $L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}$, teils zur Verdeutlichung genutzt)
$L_{Aeq,FG,IMP}$	dB(A)	gemessener Schalldruckpegel des Fremdgeräusches am Immissionsmesspunkt
$L_{Aeq,FG,IMP,Regression}$	dB(A)	gemessener Schalldruckpegel des Fremdgeräusches am Immissionsmesspunkt, bestimmt aus lin. Regression
$L_{Aeq,GG,IMP}$	dB(A)	gemessener Schalldruckpegel des Gesamtgeräusches am Immissionsmesspunkt (= $L_{Aeq,GG,IMP,gemessen}$, teils zur Verdeutlichung genutzt)
$L_{Aeq,GG,IMP,berechnet}$	dB(A)	der berechnete Gesamtgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt
$L_{Aeq,vs,WEA12,EMP2}$	dB(A)	Schalldruckpegel des Gesamtgeräusches am Referenzmesspunkt 2, verursacht durch den Betrieb beider WEA, als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
$L_{Aeq,vs,WEA1,EMP2}$	dB(A)	Schalldruckpegel des Gesamtgeräusches am Referenzmesspunkt 2, verursacht durch den Betrieb der WEA1, als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
$L_{Aeq,vs,FG,EMP2}$	dB(A)	Schalldruckpegel des Fremdgeräusches am Referenzmesspunkt 2 als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
ΔL	dB	die Differenz der Mittelwerte aus verschiedenen Schallpegeln (differenziert im Text erläutert)
ΔL_k	dB	Differenz des berechneten und gemessenen Gesamtgeräuschpegels am Immissionsmesspunkt
$\Delta L_{p,Messung}$	dB	Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle gemessenen Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen
$\Delta L_{p,Berechnung}$	dB	Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle berechneten Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen
\bar{L}_{Mess}	dB(A)	der arithm. Mittelwert der messtechnisch erhobenen und korrigierten Immissionspegel
\bar{L}_{altBer}	dB(A)	der arithm. Mittelwert der nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel
$\bar{L}_{freqBer}$	dB(A)	der arithm. Mittelwert der nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel
$L_{WA,k}$	dB(A)	immissionsrelevanter Schalleistungspegel
$L_{WA,Okt}$	dB(A)	Schalleistungspegel Oktavbandbreite
$L_{WA,Terz}$	dB(A)	Schalleistungspegel Terzbandbreite
$L_{WA,vs}$	dB(A)	immissionsrelevanter Schalleistungspegel der WEA bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten v_s
n_{Rotor}	rpm	Rotordrehzahl
v_{5m}	m/s	Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe (an den Immissionsmesspunkten)
v_{10m}	m/s	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (Emissionsmessung)
v_n	m/s	Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe (gemessen mit dem Gondelanemometer)
v_H	m/s	korrigierte, aus der Leistung gewonnenen Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe
v_s	m/s	normierte Windgeschwindigkeit
p		p-Wert als Kriterium der statistischen Signifikanz
P	kW	Leistung
P_{Nenn}	kW	Nennleistung
Φ	°	Einfallswinkel
R_0	m	Abstand des Referenzmesspunktes von der Turmmittellinie
R_{WS}	m	Abstand der Windsensoren von der Rotorebene
s	dB	Standardabweichung
S_0	m ²	Bezugsfläche
$s_{\bar{x}}$	dB	Standardfehler, als Maß für die Unsicherheit eines berechneten Mittelwertes
σ_{Prog}	dB	Unsicherheit des Prognosemodells der DIN ISO 9613-2
t_m	s	Mittelungszeit der Messungen
U_A, U_B	dB	Messunsicherheitskomponenten
U_C	dB	Gesamtmessunsicherheit (gemäß DIN EN 61400-11)
z	m	Höhe des Anemometerstativs über Boden
z_0	m	Rauigkeitslänge

Weitere Formelzeichen im Rahmen des Prognosemodells der DIN ISO 9613-2 oder der DIN EN 61400-11 werden nicht gesondert erläutert.

Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die vom Auftraggeber, dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, dem Sachverständigenbüro Uppenkamp und Partner GmbH in Auftrag gegebene erweiterte Hauptuntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2. Die Untersuchungen verfolgen insbesondere den Zweck, belastbare Daten zur Qualität von Geräuschimmissionsprognosen hoher Windenergieanlagen zu erhalten, um folglich die Prognosequalität verbessern zu können.

Die Untersuchungen haben Folgendes ergeben:

Die Messwerte zeigen, dass sich die Schallpegelabnahme im Mitwindbereich, wie unter Freifeldbedingungen üblich, auf ca. 6 dB je Abstandsverdoppelung beläuft. Im Gegenwindbereich ist die messtechnisch ermittelte Schallpegelabnahme mit ca. 7 dB zu beziffern. Die Schallausbreitung der Geräusche von hohen WEA folgt demnach den Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung einer Kugelwelle.

Weiterhin zeigt sich, dass eine Abbildung dieser messtechnisch ermittelten Schallausbreitung mittels des alternativen Berechnungsverfahrens der DIN ISO 9613-2 keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Die ermittelte Differenz wird im Wesentlichen durch die hierfür nicht einwandfreie Modellierung der Bodendämpfung A_{gr} verursacht. Während die Berechnungsvariante im Nahbereich bis 500 m der WEA sowohl im Luv als auch im Lee gut funktioniert, driften die Mess- und Rechenergebnisse darüber hinaus mit zunehmender Entfernung weit auseinander, da offenbar die Bodendämpfung A_{gr} teils deutlich überschätzt wird. Dieser Effekt ist im Mitwindbereich stärker.

Hinsichtlich einer Richtwirkung im Immissionsbereich zeigt sich, dass die Schallpegelabnahme unter Winkelvergrößerung im Bereich zwischen 0° und 45° gegen die Ausbreitungsrichtung auf ~1 dB/15° beläuft. Diese Schallpegelabnahme über die Winkelvergrößerung gegen die Ausbreitungsrichtung ist nicht allein mit der emissionsseitigen Richtwirkung einer Windenergieanlage zu begründen.

Der aktuell anzusetzende Sicherheitszuschlag von min. $1,28 \cdot \sigma_{Prog} = 1,9$ dB deckt die beschriebenen Abweichungen - verursacht durch A_{gr} - ausschließlich im Nahbereich ab. Ein zukünftiger Sicherheitszuschlag sollte konsequenterweise nun nicht pauschal vergeben werden, sondern könnte in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Emissionsquelle und Immissionsort sowie des angewandten Berechnungsmodells (z. B. dem alternativen Verfahren oder dem frequenzselektiven Verfahren unter Berücksichtigung des der Realität entsprechenden Bodenfaktors gemäß DIN ISO 9613-2) berechnet werden. Der Sicherheitszuschlag könnte durch das Heranziehen eines entsprechend noch zu ermittelnden Terms beschrieben werden.

1 Grundlagen

[1] BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) in der aktuellen Fassung
[2] 4. BImSchV	Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV) in der aktuellen Fassung
[3] TA Lärm	Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26. August 1998, GMBI 1998, Nr. 26, S. 503
[4] DIN ISO 9613-2	Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Entwurf September 1997
[5] DIN EN 61400-11	Windenergieanlagen – Teil 1: Schallmessverfahren (IEC 61400-11:2002 + A1:2006), März 2007
[6] DIN 45645-1	Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Juli 1996
[7] DIN 45681	Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, März 2005 (zzgl. Berichtigung 2, August 2006)
[8] VDI 3723-1	Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschimmissionen, Mai 1993
[9] FGW	Technische Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 1: Bestimmung der Schallemissionswerte, Revision 18, Stand 01. Febr. 2008, der Fördergesellschaft Windenergie e. V.
[10] LAI	Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen, Hinweise des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI), März 2005
[11] AL-PRO	Schalltechnisches Gutachten zum Genehmigungsbescheid für den Standort Raesfeld, Bericht-Nr. SG-060104-244-CA/NB 1 „Nachberechnung zur Schallimmissionsprognose“ vom 25. Apr. 2006 der AL-PRO GmbH & Co. KG, Großheide
[12] MBBM	Schallemissionsmessung gemäß DIN EN 61400-11 und Technische Richtlinien für Windenergieanlagen (FGW-Richtlinien) an einer Anlage vom Typ Enercon E-82 mit einer Leistung von 2000 kW am Standort 46348 Raesfeld, Prüfbericht Nr. M83 473/1 vom 18. Jan. 2011 der Müller BBM GmbH, Gelsenkirchen
[13] LANUV	Materialien Nr. 63 „Windenergieanlagen und Immissionsschutz“ des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Essen, 2002
[14] LANUV	Leistungsbeschreibung des Vorhabens „Messtechnische Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“ vom 07.12.2011 des LANUV NRW
[15] LANUV	„Weniger Lärm durch Auswahl eines ‚geeigneten‘ Prognosemodells?“, D. Piorr in: Jahresbericht des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, 2000
[16] UBA	Untersuchung über die Genauigkeit von Schallimmissionsberechnungen bei gewerblichen Anlagen, Umweltbundesamt 1979



[17] IMMI2004	„Geräuscheinwirkungen durch Windenergieanlagen“ in: Immissionsschutzbericht 2004 des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
[18] IFL	„Meteorologische Messungen mit dem SODAR-RASS-System in Raesfeld Kreis Borken“, Bericht Nr. 2013-47, November 2013, Institut für Lärmschutz GmbH (siehe Anhang E.2)
[19] HAU	„Windkraftanlagen“, E. Hau, 4. Auflage, S. 608
[20] MARTINEZ	„Messverfahren zur Bestimmung der Geräuschemission von Windenergieanlagen“, Zheng Hu – Sergio Martinez – Wilhelm Kurtz, DAGA 2010, Berlin
[21] PIORR	„Schallemmissionen von Windkraftanlagen“, D. Piorr, Landesanstalt für Immissionsschutz NRW, Essen, 1988
[22] PIORRa	„Zum Nachweis der Einhaltung von Geräuschemissionswerten mittels Prognose“, Detlef Piorr, erschienen in: ZfL, Heft Nr. 5, September 2001
[23] Kötter	Good Vibrations, „Richtcharakteristik in der Schallabstrahlung von Windenergieanlagen“, Juli 2012
[24] Sachs	Statistische Methoden, Planung und Auswertung, 7. überarbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-55821-7
[25] U+P	„Schalltechnischer Bericht der Voruntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messungen mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“, Bericht Nr. 14 1446 11 – Rev. 1 vom 6. Jul. 2012 der Uppenkamp und Partner GmbH
[26] Heimann	The wake of a wind turbine and its influence on sound propagation, Dietrich Heimann, Yvonne Käsler, Günter Gross, Meteorologische Zeitschrift Vol. 20, No. 4, 449-460 (August 2011)
[27] U+P	„Schalltechnischer Bericht der Hauptuntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messungen mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“, Bericht Nr. 14 1446 11-1 vom 4. Mrz. 2013 der Uppenkamp und Partner GmbH
[28] LANUV	Ergänzung „Änderungen am bisherigen Untersuchungskonzept“ zur Leistungsbeschreibung des Vorhabens „Messtechnische Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“ vom 07.12.2011 des LANUV NRW
[28] Engelen	Experimental evaluation of the sound propagation conditions for sounds of wind turbines at night in comparison with calculations according to DIN ISO 9613-2, AIA-DAGA 2013 Merano
[29] Oerlemans, Schepers	Prediction of wind turbine noise directivity and swish, Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark, 2009
[30] Lee et al.	Numerical modelling of wind turbine aerodynamic noise in the time domain, JASA Express Letters, published online 8 January 2013
[31] Kötter	Ausnutzung der Richtcharakteristik zur Ertragssteigerung von Windenergieanlagen an vorbelasteten Standorten, Lärmbekämpfung Bd. 9 (2014) Nr. 1



Weitere Informationen und Unterlagen wurden zur Verfügung gestellt durch:

- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Fachbereich 45, Essen,
- Kreis Borken, Fachabteilung 63.3 Anlagenbezogener Umweltschutz, Borken,
- ENERCON GmbH, Site Assessment Department – Sound Measurement Group, Remels,
- ENERCON GmbH, Forschung und Entwicklung Messtechnik, Aurich.

Im Rahmen der Auftragsbearbeitung wurden folgende Unteraufträge vergeben:

- Meteorologische Messungen mittels SODAR-RASS-System (siehe Anhang E.2),
Unterauftragnehmer: Institut für Lärmschutz GmbH (IfL), Düsseldorf.

2 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die vom Auftraggeber, dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, dem Sachverständigenbüro Uppenkamp und Partner GmbH in Auftrag gegebene erweiterte Hauptuntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2.

Den Hintergrund der Untersuchungen definiert das Bundes-Immissionsschutzgesetz [1, 2]. Danach sind genehmigungsbedürftige Windenergieanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen, u. a. in Form von Geräuschen, nicht hervorgerufen werden können bzw. verhindert werden.

Kriterien zur Ermittlung und Beurteilung, dass die von Windenergieanlagen ausgehenden Geräusche keine schädlichen Umwelteinwirkungen hervorrufen können, sind in der TA Lärm [3] definiert, die hinsichtlich der Erstellung einer Geräuschimmissionsprognose, der darin verankerten Schallausbreitungsberechnung sowie der Unsicherheit der Prognose auf die DIN ISO 9613-2 [4] verweist. Die Entwicklung der hierin enthaltenen Berechnungsverfahren, dem frequenzselektiven (allgemeinen Verfahren) sowie dem nicht-frequenzselektiven (alternativen) Verfahren, erfolgte für „bodennahe“ Quellen, infolgedessen sich Angaben zur „geschätzten Genauigkeit“ der Verfahren auf den „bodennahen“ Bereich bis max. 30 m über GOK beziehen. Moderne Windenergieanlagen verfügen jedoch über Nabenhöhen von teils mehr als 100 m.

Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) empfiehlt in [10], Geräuschimmissionsprognosen für Windenergieanlagen nach dem alternativen Verfahren durchzuführen, da es laut [15] entgegen dem frequenzselektiven Verfahren - dieses überschätzt die Bodendämpfung A_{gr} für hochliegende Quellen - höhere Immissionen für die Schallausbreitung hochliegender Quellen über Ackerboden und Wiesen prognostiziert.

Der so entstehende konservative Berechnungsansatz zzgl. eines in Summe mit mindestens $1,28 \cdot \sigma_{Prog} = 1,9$ dB anzusetzenden Sicherheitszuschlag (Unsicherheit der Prognose Unsicherheit der Prognose, Nachweis der Richtwertehaltung mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %) liefert aktuell einen nicht durch systematische Untersuchungen abgesicherten Prognoseansatz, wobei sowohl eine Unterschätzung der Geräuschimmissionen als auch eine Überschätzung der Geräuschimmissionen Auswirkungen haben können.

Die messtechnische Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen dient insbesondere dem Zweck, belastbare Daten zur Qualität von Geräuschimmissionsprognosen hoher Windenergieanlagen zu erhalten und folglich die Prognosequalität verbessern zu können.



Basierend auf einer Vielzahl die Messungen beeinflussender Rahmenbedingungen diente eine im Mai 2012 durch die Uppenkamp und Partner GmbH durchgeführte Voruntersuchung¹ der Klärung zentraler Fragen hinsichtlich der Durchführbarkeit des Messvorhabens. Im Rahmen der Hauptuntersuchung² wurden dann im Zeitraum Okt.-Nov. 2012 in 5 Messnächten Daten erhoben und ausgewertet.

Die ermittelten Ergebnisse bedurften weiterer Untersuchungen, die im Rahmen der gegenständlichen, erweiterten Hauptuntersuchung (5 weitere Messnächte) durchgeführt wurden.

- ¹ vgl. „Schalltechnischer Bericht der Voruntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messungen mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“, Bericht Nr. 14 1446 11 – Rev. 1 vom 6. Jul. 2012 der Uppenkamp und Partner GmbH
- ² vgl. „Schalltechnischer Bericht der Hauptuntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messungen mit Ausbreitungsberechnungen nach DIN ISO 9613-2“, Bericht Nr. 14 1446 11-1 vom 4. Mrz. 2013 der Uppenkamp und Partner GmbH

2.1 Grundlegende Rahmenbedingungen

Grundsätzlich wird eine messtechnische Untersuchung der Ausbreitungscharakteristik von Geräuschen hoher Windenergieanlagen vor dem Hintergrund der Fragestellung, inwieweit die Qualität der Prognoseberechnungen verbesserungswürdig ist, durch eine Vielzahl von Rahmenbedingungen, die im Wesentlichen auf das typische Geräuschverhalten von Windenergieanlagen zurückzuführen sind, beeinflusst. Zentraler Punkt ist hierbei die Tatsache, dass Windenergieanlagen erst bei – mit z. T. deutlichen Fremdgeräuschen einhergehenden – hohen Windgeschwindigkeiten zwischen $v_{10m} = 8$ m/s und $v_{10m} = 10$ m/s ihre max. Geräuschemissionen aufweisen.

Messtechnische Untersuchungen in Immissionsbereichen mit großen Entfernungen zu Windenergieanlagen stehen somit vor der Problematik des häufig unzureichenden Abstandes zwischen dem Gesamtgeräusch- und dem Fremdgeräuschpegel. Im Rahmen der Untersuchung wird dem mit einer Anhebung der Rotordrehzahl, u. a. durch Änderung der Blatteinstellwinkel, bei niedrigen Windgeschwindigkeiten von $v_{10m} < 8$ m/s entgegengewirkt, da laut [19] bekannt ist, dass der Schallleistungspegel einer Windenergieanlage entsprechend $50 \lg(\eta_{\text{Rotor},2}/\eta_{\text{Rotor},1})$ ansteigt („Messmodus“).

Neben dem Faktor „Windgeschwindigkeit“ haben zudem „meteorologische Randbedingungen“ laut [14] einen teils erheblichen Einfluss auf die Schallausbreitung von durch Windenergieanlagen verursachte Geräusche im immissionsrelevanten Abstandsbereich, infolgedessen die Repräsentativität der Messergebnisse erst durch eine nach Ziffer A.3.3.7 TA Lärm in Verbindung mit dem Abschnitt 7.2 der DIN 45645-1 [6] beschriebene Anzahl unabhängiger Messungen gegeben ist³. Weiterhin steigt, wie die VDI-Richtlinie 3723 Blatt 1 [8] zeigt, die Genauigkeit mit der Anzahl unabhängiger Messungen.

Auf Grundlage des in [17] ermittelten Schwankungsbereiches der Immissionspegel von Windenergieanlagen in größeren Entfernungen sowie der Zielsetzung der gegenständlichen Untersuchung hinsichtlich der Verbesserung der Prognosequalität der Geräuschimmissionen hoher Windenergieanlagen sind die Auswertungen unter Berücksichtigung der Mindestanforderung – definiert durch die Standardqualität der TA Lärm – auf Basis von wenigstens fünf in meteorologisch unabhängigen Nächten erhobenen Messreihen durchzuführen.

Basierend auf der Vielzahl der dargestellten, die Messungen beeinflussenden Rahmenbedingungen wurde das Vorhaben zunächst in eine Voruntersuchung und eine Hauptuntersuchung gesplittet, um zentrale Fragen und mögliche Unwägbarkeiten im Vorfeld einschätzen und klären zu können. Nach Auswertung der Hauptuntersuchung zeigte sich, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um aufgeworfene Fragen zu klären. Diese wurden dann im Rahmen der erweiterten Hauptuntersuchung durchgeführt.

³ vgl. auch [16]: die Wiederholstreuung der Messergebnisse aus einer Nacht ist deutlich geringer als die Wiederholstreuung von Messergebnissen mehrerer Nächte.

2.2 Beschreibung des Untersuchungsstandortes

Die messtechnische Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen zur Nachtzeit und Vergleich der Messergebnisse mit Ausbreitungsrechnungen nach DIN ISO 9613-2 wurde an einem Standort in NRW durchgeführt.

Die als Emissionsquellen dienenden Windenergieanlagen vom Typ E-82 E1 der Enercon GmbH befinden sich in einem durch Fremd- und Störgeräusche wenig beaufschlagten Gebiet. Das Umfeld ist maßgeblich durch landwirtschaftlich genutzte Flächen (Äcker und Wiesen) sowie einzelne Waldstücke geprägt. Neben landwirtschaftlichen Verkehrswegen verläuft westlich in ca. 2 km eine Bundesstraße, südlich in ca. 1.8 km eine Kreisstraße sowie nördlich in ca. 1.5 km eine Landesstraße. Die Geländehöhe beträgt im relevanten Messbereich ca. 58 m ü. NHN.

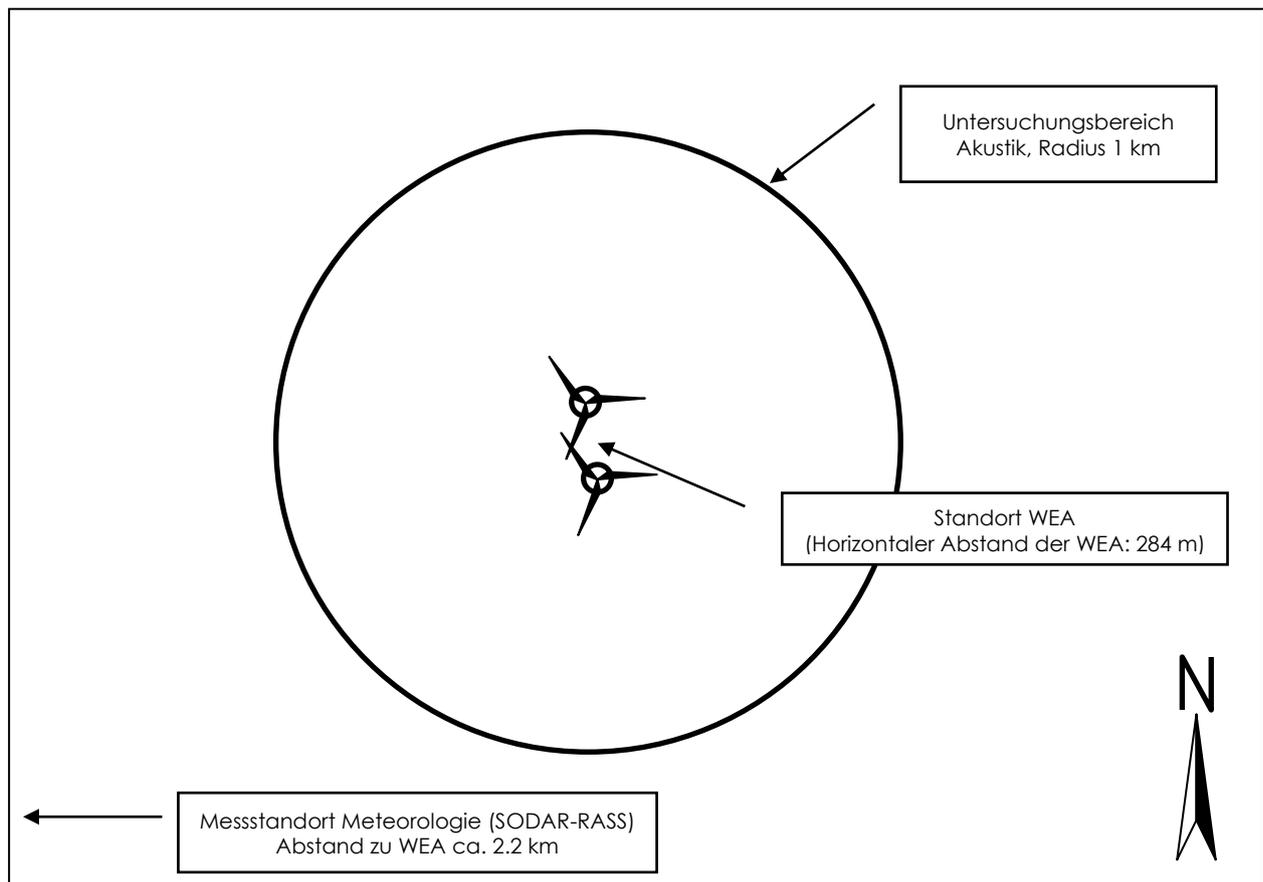


Abbildung 1 Standort Messdurchführung (ohne Maßstab)

Weitere im Untersuchungsgebiet befindliche WEA wurden während der gesamten Messzeit zur Reduzierung der Fremdgeräuscheinflüsse abgeschaltet.

2.3 Beschreibung der Windenergieanlagen

Als Emissionsquellen dienen zwei Anlagen des Typs E-82 E2 der Enercon GmbH. Allgemeine und technische Angaben zu den Windenergieanlagen sowie die Leistungskennlinie des Messmodus können der nachstehenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 1 Beschreibung der Windenergieanlagen

Allgemeine Angaben	WEA 1 (Nord)	WEA 2 (Süd)
Anlagenhersteller / Anlagentyp	Enercon GmbH / E-82 E1	
Standort RW (GK) / HW (GK)	[REDACTED]	[REDACTED]
Technische Daten		
Betriebsmodus / Nennleistung	Messmodus / 2.000 kW	
Rotordurchmesser / Nabhöhe über Grund	82 m / 98,3 m	
Turmbauart	Stahlrohr	
Leistungsregelung	Pitch	
Windgeschwindigkeit v_{10m} bei 95 % Nennleistung	8,0 m/s	
Turmdurchmesser am Fußpunkt	7,5 m	
Horizontaler Abstand Rotorflansch - Turmmittellinie	4,32 m	
Leistungskennlinie Messmodus (berechnet) ⁴		
	v_n in m/s	P in kW
	1	0
	2	3
	3	21
	4	70
	5	145
	6	275
	7	480
	8	750
	9	1.180
	10	1.580
	11	1.810
	12	1.980
	13-25	2.050

Weitere Angaben, z. B. hinsichtlich der im Messmodus zu erwartenden Rotordrehzahl, wurden durch die Enercon GmbH nicht zur Verfügung gestellt.

⁴ in der Version 1.0 vom 13.04.2012 zur Verfügung gestellt durch die Enercon GmbH (Messtechnik-Akustik & Schwingungen)

2.4 Voruntersuchung, Hauptuntersuchung und erweiterte Hauptuntersuchung

2.4.1 Differenzierung des Untersuchungsumfangs

Der in die Untersuchungsabschnitte Voruntersuchung, Hauptuntersuchung und anschließender erweiterter Hauptuntersuchung gegliederte Auftrag beinhaltet während der genannten Abschnitte die folgenden Arbeitsschritte:

Tabelle 2 Differenzierung: Voruntersuchung und Hauptuntersuchung

Arbeitsschritt	Vorunter- suchung	Hauptunter- suchung	Erweiterte Hauptunter- suchung
Emissionsquellendefinition Ermittlung des Schalleistungspegels L_{WA} der als Emissionsquellen genutzten zwei Windenergieanlagen im Betriebsmodus „Messmode“ und Untersuchungen hinsichtlich der messtechnischen Praktikabilität einer 2-Quellen-Konfiguration	X	X	X
Immissionsmessungen Durchführung von Immissionsmessungen in Mit- und Gegenwindrichtung in Abständen von 500 m, 750 m sowie 1.000 m in Form von Gesamtgeräusch- und FG-Messungen zur rechnerischen Ermittlung des Anlagengeräusches unter Berücksichtigung der messtechnisch ermittelten Windgeschwindigkeit an den einzelnen Messpunkten	X	X	X
Meteorologische Messungen Kennzeichnung der Meteorologie mittels SODAR-RASS	X	X	X
Auswertung der Emissions- und Immissionsmessungen	X	X	X
Modellbildung Modellierung der Schallausbreitung nach Abschnitt 7.3.1 und 7.3.2 DIN ISO 9613-2 und Berechnung der Immissionspegel an den einzelnen Messpunkten unter Berücksichtigung der im Rahmen der Auswertung der Emissionsmessungen erhaltenen Schalleistungspegel der untersuchten WEA	X	X	X
Vergleich Messung-Berechnung Vergleich der Messergebnisse zur Schallausbreitung mit den Berechnungsergebnissen nach DIN ISO 9613-2 (7.3.1 und 7.3.2)	X	X	X
Einschätzung der Praktikabilität des Verfahrens Vermittlung der gewonnenen Erkenntnisse zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Durchführung weiterer Untersuchungen	X		
Weitere 5 Messungen (vgl. Immissionsmessungen) in meteorologisch unabhängigen Nächten		X	
Statistische Auswertung der durchgeführten Messungen Vergleich der Messergebnisse mit den Modellergebnissen und Bestimmung der mittleren Differenzen zzgl. der zugehörigen Standardabweichungen		X	X ⁽¹⁾
Abschätzung Sind weitere Messungen notwendig, um eine mittlere Differenz von 1,5 dB (vgl. $\sigma_{Prog} = 1,5$ dB) statistisch signifikant erkennen zu können?		X	
Weitere 5 Messungen in meteorologisch unabhängigen Nächten. Im Immissionsbereich in 15°, 30°- und 45°-Winkeln zur Mitwindrichtung			X

(1) die Daten der Hauptuntersuchung fließen hier unter Berücksichtigung der aktuellen Methodik hinsichtlich der Auswertung der Ergebnisse mit ein

2.4.2 Ergebnisse der Voruntersuchung

Die im Rahmen der Voruntersuchung zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen messtechnisch und rechnerisch ermittelten Ergebnisse zeigen im ersten Ansatz, dass die Immissionspegel im Mit- und Gegenwindbereich vergleichbare Ergebnisse liefern. Wie die Ergebnisse der Voruntersuchung zeigen, liegen die messtechnisch ermittelten Immissionspegel des Anlagengeräusches $L_{Aeq,AG,IMP}$ im 400 m (750 m) entfernten Mitwindbereich min. 1.5 dB (2.2 dB) oberhalb der berechneten Immissionspegel. Im Gegenwindbereich in 500 m Entfernung beträgt der Unterschied min. 2.0 dB.

Tabelle 3 Vergleich der berechneten und messtechnisch erhobenen Immissionspegel

Immissionsort Beschreibung	Abstand	Schallleistungspegel		Allgemeines Verf. gemäß 7.3.1 DIN ISO 9613-2	Alternatives Verf. gemäß 7.3.2 DIN ISO 9613-2	Immissionsmessungen gemäß DIN 45645-1
		WEA1	WEA2	L_{WA} in dB(A)	L_{AT} in dB(A)	L_{AT} in dB(A)
IMPDW500	400 m			41.6	45.2	46.7
IMPDW750	750 m			35.6	37.2	39.4
IMPDW1000	950 m	104.8	103.8	33.1	34.3	-
IMPUW500	500 m			39.8	42.6	44.6
IMPUW750	750 m			35.7	37.4	-
IMPUW1000	1.000 m			32.5	33.6	-

Die Emissionsmessungen nach DIN EN 61400-11 zeigen, dass der durch die Enercon GmbH eingerichtete Messmodus nicht die erwünschte, im Vergleich zum Nennleistungsbetrieb erhöhte Schallleistung lieferte, die zunächst anvisiert wurde. In Verbindung mit der am Standort vorherrschenden Fremdgeräuschsituation wurde erkannt, dass sich die nach DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel bei Entfernungen von 1.000 m sowie teils bei 750 m unterhalb des bei hohen Windgeschwindigkeiten vorliegenden Fremdgeräuschpegels an den gewählten Immissionsmesspunkten befinden.

Im Rahmen der Voruntersuchung wurde eine Rotordrehzahl zwischen $n_{Rotor} = 16$ rpm und $n_{Rotor} = 18$ rpm bei $v_n < 10$ m/s erzielt. Diese wurde laut [12] bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von $v_s = 8.5$ m/s (Nennleistung) ebenfalls erreicht. Nach Rücksprache mit der Enercon GmbH konnte bestätigt werden, dass der „Messmodus“ im Wesentlichen zu hohen Rotordrehzahlen bereits bei niedrigen Windgeschwindigkeiten führt. Ab einer Drehzahl von 16 rpm nähern sich die Parameter der Leistungskennlinien („Messmodus“ und Normalbetrieb) wieder an.

Die Messungen im Rahmen der Hauptuntersuchung werden somit bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten von ca. $v_s = 5$ m/s durchgeführt, um die Anhebung der Rotordrehzahl und die damit verbundene Schallleistungspegelerhöhung bei geringen Fremdgeräuschpegeln zu nutzen.



2.4.3 Ergebnisse der Hauptuntersuchung

Die Bestimmung der mittleren Differenzen und der zugehörigen Standardabweichungen der an den unterschiedlichen Immissionsmesspunkten messtechnisch erhobenen und korrigierten sowie der auf Grundlage der DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel erfolgte unter Berücksichtigung unterschiedlicher Datensortierungen hinsichtlich der realisierten Entfernungen der Messpunkte im Immissionsbereich. Die nach Mit- und Gegenwindbereich getrennt durchgeführte Auswertung in Abstandsklassen lieferte hierbei plausible Ergebnisse⁵.

Tabelle 4 Auswertung Hauptuntersuchung 2012

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (B_g)												
Sortierung nach Abstandsklassen, DW/UW getrennt, fehlerbehaftete Daten verworfen α=0.10												
Klasse	d _m m	s m	Anz.	\overline{L}_{Mess} dB(A)	$S_{\overline{x}}$ dB	\overline{L}_{altBer} dB(A)	$S_{\overline{x}}$ dB	$\Delta L = \overline{L}_{altBer} - \overline{L}_{Mess}$ dB	$S_{\overline{x}}$ dB	$\Delta L - S_{\overline{x}}$ dB	$\Delta L + S_{\overline{x}}$ dB	p -
DW 350-550 m	455	55	6	39.0	0.9	38.6	0.8	-0.4	0.6	-1.0	0.3	0.76
DW 551-800 m	714	54	3	34.4	1.0	32.0	1.4	-2.4	0.6	-3.0	-1.7	0.24
DW 801-1100 m	939	113	3	32.3	1.6	28.7	1.7	-3.6	0.2	-3.8	-3.4	0.20
UW 350-550 m	442	69	4	38.8	1.7	38.8	1.6	0.0	0.6	-0.6	0.6	1.00
UW 551-800 m	723	49	5	33.6	1.8	32.7	1.1	-0.8	0.8	-1.6	0.0	0.71
UW 801-1100 m	971	68	6	32.0	1.2	29.1	1.0	-2.9	0.6	-3.5	-2.3	0.08

Wie die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, belegen die Werte der Differenz ΔL in dB ausnahmslos, dass die Mittelwerte der messtechnisch ermittelten Schalldruckpegel an den Immissionsmesspunkten \overline{L}_{Mess} in dB(A) oberhalb der Mittelwerte \overline{L}_{altBer} in dB(A) der Berechnungen nach dem alternativen Verfahren der DIN ISO 9613-2 einzuordnen sind.

Wie zu erkennen ist, treten im Mitwindbereich Differenzen zwischen -0.4 dB und -3,6 dB auf. Im Gegenwindbereich ist ΔL zwischen 0 dB und -2.9 dB einzuordnen. Die Differenz ΔL in dB wächst somit über die Abstandsvergrößerung zwischen Emissionsquellen und Immissionspunkten. Im Gegenwindbereich (UW) fällt die Differenz ΔL in dB dabei gegenüber den Messungen im Mitwindbereich (DW) geringer aus.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die mittleren Differenzen ΔL in dB den gegenwärtig im Rahmen von Geräuschimmissionsprognose für WEA anzusetzenden Sicherheitszuschlag von 1.9 dB ($1.28 \cdot \sigma_{Prog}$) im Mitwindbereich bis 550 m sowie im Gegenwindbereich bis 800 m unterschreiten. Teils deutliche Überschreitungen von bis zu 1.7 dB sind im Mit- und Gegenwindbereich bei Abständen zwischen 800 m und 1.100 m zu verzeichnen.

⁵ Die hier dargestellten Ergebnisse implizieren die Auswertung in 30-sec Intervallen. Darüber hinaus wurden drei Messwerte aufgrund physikalisch nicht zu begründender, deutlich zu geringen Dämpfungskonstanten D und einer damit einhergehenden, erheblichen quadratischen Abweichung sowie einer im Falle von zwei Datensätzen zweifelbehafteten Differenz der Mess- und Berechnungsdaten verworfen.

Unter Berücksichtigung des ermittelten Standardfehlers zeigt die Untersuchung, dass die Ergebnisse der gegenständlichen Untersuchung für den Mitwindbereich bis 550 m sowie für den Gegenwindbereich bis 800 m durch den Sicherheitszuschlag von 1.9 dB abgedeckt werden.

Die vorgefundene Schallausbreitung, hier unter Berücksichtigung des Verzichts auf die weitere Auswertung dreier „Ausreißer“ im Mitwindbereich als Differenzen zwischen den messtechnisch erhobenen Werten und der alternativen Berechnungsvariante der DIN ISO 9613-2 dargestellt, deutet auf eine Abstandsabhängigkeit der Differenzen im Mitwindbereich hin, die im logarithmischen Maßstab entsprechend ca. $11\log(d)$ verläuft.

Aus den meteorologischen Randbedingungen der Ausbreitungsmessungen ist u. E. nicht erkennbar, dass die Ausbreitungsmessungen unter „besonderen“ Witterungsbedingungen erfolgten, welche die Schallausbreitung in einer geführten (Zylinder-)Welle begünstigt haben könnten.

Die in Mitwindrichtung in größeren Abständen zu den Windenergieanlagen vorgefundenen, im Vergleich zur Berechnung nach DIN ISO 9613-2 erhöhten Schallimmissionen, können möglicherweise durch die in [26] beschriebenen Wirkungsmechanismen erklärt werden.

2.4.4 Beschreibung der erweiterten Hauptuntersuchung

Die im Jahr 2012 durchgeführten Messungen im Rahmen der Hauptuntersuchung deuten in Mitwindrichtung auf eine mit zunehmendem Abstand systematische Unterschätzung der auftretenden Schallimmissionen hin. Da die während der Messungen dokumentierten höhenabhängigen Wind- und Temperaturprofile keine Auffälligkeit zeigten, sind zurzeit grundsätzlich drei unterschiedliche Ursachen für die Abweichungen zwischen Messung und Prognose in Diskussion.

Eine unzureichende Nachbildung der Bodenreflexion im Prognosemodell...

...würde sich großflächig im Umfeld der Windenergieanlagen ausbilden, der Effekt würde sich abstandsabhängig, also in alle Richtungen gleich auswirken. Für bodennahe Quellen (ca. 20 m Höhe) würde der Effekt aufgrund geometrischer Ähnlichkeitsgesetze schon bei Abständen von etwa 140 m zu erwarten sein, also in Bereichen, in denen die DIN ISO 9613-2 vielfach erprobt ist.

Eine zusätzliche „Verbiegung“ des Windprofils durch den Rotor der Windenergieanlage...

...zeigt nach einer theoretischen Berechnung in [26] nur örtlich begrenzte Wirkungen in einem sehr schmalen Mitwindbereich ($\pm 10^\circ$). Die Messergebnisse der Messpunkte, die bei der Hauptuntersuchung nicht exakt in Mitwindrichtung lagen, zeigen eine Pegelerhöhung. Möglicherweise ist die „Verbiegung“ des Windfeldes, die bei den Messungen im Rahmen der Hauptuntersuchung auftrat, nicht mit derjenigen vergleichbar, die den Berechnungen von Heimann zugrunde gelegt wurde, und eine exaktere Modellierung würde die erhobenen Messergebnisse nachbilden können.

Eine 3D-Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Windenergieanlagen...

...belegt mit Messergebnissen, gibt es bislang nicht, da derartige Messungen aufgrund der Abmessungen der Anlagen praktisch nicht durchgeführt werden können. Bekannt sind die Richtcharakteristiken, welche in Bodennähe erfasst wurden (vgl. hierzu [21, 23, 31]). Sie ermitteln jedoch keine Erkenntnisse über die Schallabstrahlung in Richtung Rotorachse. Falls in Richtung der Rotorachse eine verstärkte Schallabstrahlung auftritt, würde diese im Emissionsmessbereich nicht erkennbar sein, jedoch dazu führen, dass mit zunehmender Entfernung in einem breiten Mitwind- und Gegenwindbereich verstärkte Schallpegel auftreten können.

Im Rahmen der gegenständlichen, erweiterten Hauptuntersuchung sollen Erkenntnisse über die Breite des Bereichs erfasst werden, in dem unter Mitwindbedingungen eine verstärkte Schallimmission auftritt. Dazu werden, zusätzlich zu den in einem Abstand von 500 m, 750 m und 1.000 m positionierten Mitwindmesspunkten, drei Messpunkte in einem Abstand von 750 m zu den Emissionsquellen unter Winkeln von ca. 15° , 30° und 45° zur Mitwindrichtung gelegt. Auf Messungen in Gegenwindrichtung wird im weiteren Verlauf verzichtet.



3 Durchführung der erweiterten Hauptuntersuchung

3.1 Messbedingungen

Nachfolgend sind die Messbedingungen während der Messnächte dargestellt:

Tabelle 5 Messbedingungen

Standortangaben					
Ausbreitungsbedingungen	freie Schallausbreitung				
Art der Landschaft	ebenes Gelände				
Landschaftsoberfläche	landwirtschaftlich genutzte Flächen, kleine Waldstücke				
Reflektierende Flächen an den Messpunkten	keine				
Meteorologische Daten	1. Messnacht	2. Messnacht	3. Messnacht	4. Messnacht	5. Messnacht
Windgeschwindigkeit Nabenhöhe in m/s	2-11	2-11	2-11	1-10	1-10
Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe in m/s	0 – 5	0 – 4	0 – 7	0 – 6	0 - 3
Windrichtung in °	240	200	245	180	200
Lufttemperatur in °C	8	6	7	6	5
Luftdruck in kPa	101.3	102.3	99.2	102.6	102.7
Luftfeuchtigkeit in %	77	84	91	90	93
Bedeckungsgrad	2/8	1/8	8/8	6/8	4-6/8
sonst. Bedingungen	trocken	trocken	trocken	trocken	trocken
Messdurchführung	1. Messnacht	2. Messnacht	3. Messnacht	4. Messnacht	5. Messnacht
Datum	29.10.2013	30.10.2013	04.11.2013 – 05.11.2013	11.11.2013 – 12.11.2013	13.11.2013 – 14.11.2013
Messzeitraum (hh:mm) Fremdgeräuschemessungen	22:26-22:39 23:20-23:29	22:23-22:36 23:18-23:31	23:21-23:32 00:09-00:20	22:54-23:11 23:54-00:09	23:46-00:02 00:42-00:59
Messzeitraum (hh:mm) Gesamtgeräuschemessungen	22:45-22:19	22:43-23:16	23:37-00:07	23:16-23:53	00:08-00:39
Personal					
Messingenieure	B. Eng. Justus Engelen, B. Eng. Jennifer Roberts				
Messgehilfen	B. Eng. Sebastian Plätzmüller, Christoph Grotholtmann, Dipl.-Ing. Matthias. Brun				

Die nicht-akustischen Messungen zur Kennzeichnung der Anlagenparameter bzw. der meteorologischen Bedingungen erfolgten zeitsynchron zu den o. g. akustischen Messungen.



3.2 Beschreibung der eingerichteten Messpunkte

3.2.1 Messpunkte der Emissionsmessungen in der 2-Quellen-Konfiguration

Zur Ermittlung der Schalleistungspegel der als Emissionsquellen dienenden Windenergieanlagen in der 2-Quellen-Konfiguration wurden die Emissionsmesspunkte EMPWEA1 und EMPWEA2 entsprechend den Vorgaben der DIN EN 61400-11 eingerichtet. Hierbei sind folgende Anlagenparameter zu berücksichtigen:

Vertikaler Abstand des Rotormittelpunktes vom Boden	H = 98,3 m
Rotordurchmesser	D = 82,0 m
Turmdurchmesser am Fußpunkt	D_T = 7,5 m
Höhe des Anemometer-Stativs über Boden	z = 10,0 m
Abstand des Rotorflanschmittelpunktes zur Turmmittellinie von	D_{Fl-TM} = 4,32 m
Höhendifferenz zwischen Mikrofon und Turmfußpunkt von	Δh = 0,0 m

Die Messpunkte sind somit entsprechend der DIN EN 61400-11 unter Berücksichtigung der folgenden Toleranzbereiche einzurichten:

Abstand des Referenzmesspunktes von der Turmmittellinie	114 m < R₀ < 172 m
Abstand der Windsensoren von der Rotorebene	164 m < R_{WS} < 328 m
Bereich für die Anordnung der Windsensoren	- 30° < β_{WS} < + 30°

Es wurden folgende Messpositionen gewählt:

Tabelle 6 Messpositionen der Emissionsmessungen

Emissionsmessung WEA 1 und WEA 2	Position				
Mikrofonpositionen	jeweils leeseitig im o. g. Toleranzbereich R₀ (ausgenommen: WEA2, Nr. 4)				
Messnacht	1	2	3	4	5
Abstand R₀ in m (WEA 1/WEA2)	128/128	128/130	126/130	128/88	120/127
Φ in ° (WEA 1/WEA2)	37/37	37/36	37/36	37/47	38/37
Standort und Höhe des Anemometers	ca. 200 m westlich der WEA, in einer Höhe von 10 m, luvseitig				

Die Referenzmesspunkte müssen - bezogen auf die Windrichtung - während der Messung innerhalb eines Winkelbereichs von ± 15° liegen. Die Lage wurde ständig überprüft und eingehalten. Der Einfallswinkel **Φ** berechnet sich für die gewählten Positionen der schallharten Platte zu den o. g. Werten. Die Anforderung nach DIN EN 61400-11 (25° < **Φ** < 40°) wird damit – mit Ausnahme der Messung Nr. 4 (WEA 2) erfüllt⁶.

⁶ Nähere Informationen hinsichtlich der gegenseitigen akustischen Beeinflussung der Messpunkte durch die jeweils andere Windenergieanlage werden in Abschnitt 4.1.2 behandelt.

3.2.2 Messpunkte der Immissionsmessungen

Zur messtechnischen Ermittlung der Ausbreitungsbedingungen der Geräusche von hohen Windenergieanlagen wurden im Umfeld der als Emissionsquellen eingesetzten WEA insgesamt sechs Immissionsmesspunkte eingerichtet. Diese befinden sich im Rahmen der erweiterten Hauptuntersuchung ausschließlich im Mitwindbereich (Downwind, DW), d.h. hinter den Anlagen (im Lee). Neben drei Messpunkten entlang der Ausbreitungsrichtung werden weitere drei Messpunkte in einem Abstand von 750 m zu den Emissionsquellen unter Winkeln von ca. 15°, 30° und 45° zur Mitwindrichtung gelegt. Die endgültige Lage der Messpunkte für die Immissionsmessungen wurde entsprechend der an den Messtagen vorherrschenden Windrichtung ausgewählt.

Die nachstehende Grafik verdeutlicht die Konfiguration der Messpunkte in der ersten Messnacht. Die Immissionsmesspunkte wurden entsprechend der Windrichtung auf einer um $\alpha = +60^\circ$ gegenüber der vertikalen, durch den geometrischen Mittelpunkt der beiden WEA verlaufenden Strecke, gedrehten Achse angeordnet.

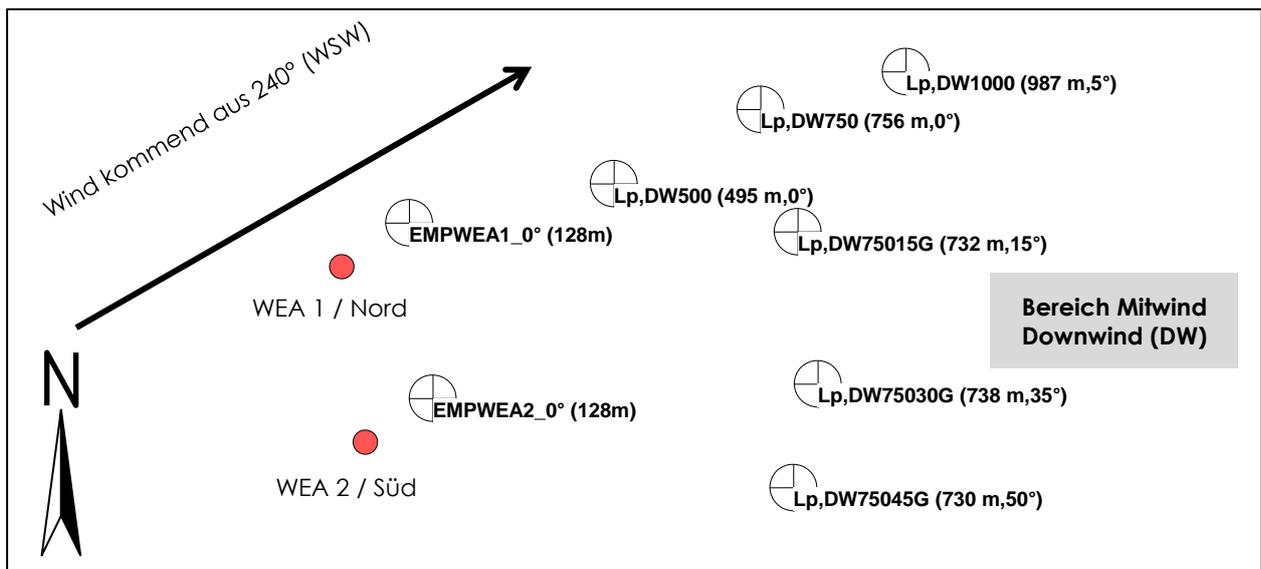


Abbildung 2 Grafik zur Konfiguration der Immissionsmessung (ohne Maßstab)

Bezeichnung	IMPDW75015G
Erläuterung	I-Messpunkt (IMP) – Downwind (DW) – gepl. Entfernung 750 m – gepl. rel. Winkel (15G)
Angaben in Klammern:	tatsüchl. Entf. zum Mittelpunkt zwischen den WEA, Winkel gegenüber Ausbreitungsrichtung

Weitere Informationen (u. a. RW/HW) zu den ausgewählten Messpunkten innerhalb sämtlicher Messnächte können dem Anhang F entnommen werden.



Teilweise konnten die geplanten Immissionsmesspunkte aufgrund der topografischen Situation nicht exakt in den ursprünglich vorgesehenen Entfernungen eingerichtet werden. Die tatsächlich realisierte Entfernung zwischen dem Mittelpunkt der WEA und den Immissionsmesspunkten sowie der realisierte, relative Winkel gegen die Ausbreitungsrichtung (Windrichtung) sind untenstehend angegeben.

Tabelle 7 Konfiguration Immissionsmessung

Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)				
	1. Messnacht	2. Messnacht	3. Messnacht	4. Messnacht	5. Messnacht
	Ausbreitungs- richtung: 55° Wind aus WSW	Ausbreitungs- richtung: 20° Wind aus SSW	Ausbreitungs- richtung: 65° Wind aus WSW	Ausbreitungs- richtung: 0° Wind aus S	Ausbreitungs- richtung: 20° Wind aus SSW
IMPDW500	495 / 0	534 / 0	496 / -5	525 / 5	518 / -5
IMPDW750	756 / 0	783 / -5	746 / 10	732 / 10	709 / -5
IMPDW75015G	732 / 15	766 / 10	717 / 25	750 / 15	702 / 10
IMPDW75030G	738 / 35	798 / 35	724 / 40	756 / 30	765 / 35
IMPDW75045G	730 / 50	859 / 45	737 / 50	782 / 45	731 / 50
IMPDW1000	987 / 5	1.056 / -10	882 / 15	1.010 / 10	1.123 / 0

(1) IMP-MiP in m: tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Die akustischen sowie nicht-akustischen Messungen an sämtlichen Messpunkten wurden in 4 m Höhe durchgeführt. Die eingesetzte Messtechnik kann dem Kapitel 3.3 entnommen werden.

3.2.3 Geräuschcharakteristik im Bereich der Messpunkte

Im Vorfeld der Messungen wurden die Messpunkte der Emissions- sowie der Immissionsmessungen unter Berücksichtigung der Windrichtung sowie der gewünschten bzw. erforderlichen Abstände zu den Emissionsquellen eingerichtet. Wie zuvor beschrieben, lieferte die Topografie des Geländes hier Einschränkungen in Form von kleineren Waldstücken im Untersuchungsgebiet. Vor diesem Hintergrund und insbesondere zur Reduzierung der mit entsprechenden Geländestrukturen einhergehenden Fremdgeräuscheinflüsse wurden die genannten immissionsseitigen Messpunkte ausgewählt. Die spezifische Geräuschcharakteristik im Bereich der Messpunkte hinsichtlich Fremdgeräuscheinfluss sowie die dafür verantwortlichen Rahmenbedingungen sind in der nachstehenden Abbildung erläutert. Fremdgeräuscheinflüsse durch Straßenverkehr o. Ä. wurden ausschließlich vereinzelt auf den unmittelbar angrenzenden Wirtschaftswegen verzeichnet. Entsprechende Messwerte wurden entfernt. Sämtliche übergeordnete Straßen beeinflussten die Messungen nicht.



3.3 Eingesetzte Messtechnik

Für die akustischen und nicht-akustischen Messungen an den Immissions- und Emissionsmesspunkten sowie zur Datenerfassung der Anlagenparameter wurden die nachfolgend aufgeführten Geräte verwendet.

Tabelle 8 Messgeräteleiste

Bezeichnung	Hersteller	Typ	Seriennummer
Emissionsmessungen			
Analysator	Brüel & Kjaer	PULSE 3560BT01	2448690 / 2469191
½"- Freifeldmikrofon, vorpolarisiert, mit Vorverstärker	Brüel & Kjaer	4189-A-021	2471968 und 2471958
akustischer Kalibrator	Brüel & Kjaer	4231	2147156
8 Kanal Eingangsanpassung für PULSE	Brüel & Kjaer	FAV81	-
Digitalrecorder	Tascam	DR-100	-
4 Kanal Datalogger	Velleman	PCS10	-
Primärwindschirme	Brüel & Kjaer	UA0237	-
Sekundärwindschirme	U+P GmbH	-	-
schallharte Platten	U+P GmbH	-	-
Messwertgeber für Windgeschwindigkeit	Lambrecht	00.14575.200004	711493.0050
Messwertgeber für Windrichtung	Lambrecht	14565-24V	00.14564.200 304
Barometer/Thermometer/Hygrometer	Lufft	2247.0561	-
Immissionsmessungen			
Schallpegelanalysator	Brüel & Kjaer	2250	2488390
Mikrofon	Brüel & Kjaer	4189 + Primärwindschirm UA1650	2470153
Akustischer Kalibrator	Brüel & Kjaer	4231	2147156
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7225 (Erweitere Protokollierung)	Version 3.2
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7226 (Schallaufzeichnung)	Version 3.2
Sekundärwindschirm	U+P GmbH		
Schallpegelanalysator	Brüel & Kjaer	2250	2506520
Mikrofon	Brüel & Kjaer	4189 + Primärwindschirm UA1650	2607958
Akustischer Kalibrator	Brüel & Kjaer	4231	2524762
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7225 (Erweitere Protokollierung)	Version 3.2
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7226 (Schallaufzeichnung)	Version 3.2
Sekundärwindschirm	U+P GmbH		
Schallpegelanalysator	Brüel & Kjaer	2250	2764965
Mikrofon	Brüel & Kjaer	4189 + Primärwindschirm UA1650	2754827
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7225 (Erweitere Protokollierung)	Version 4.0.1
Modulsoftware	Brüel & Kjaer	BZ7226 (Schallaufzeichnung)	Version 4.0.1
Sekundärwindschirm	U+P GmbH		

Bezeichnung	Hersteller	Typ	Seriennummer
Schallpegelanalysator Mikrofon Modulsoftware Modulsoftware Sekundärwindschirm	Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer U+P GmbH	2250 4189 + Primärwindschirm UA1650 BZ7225 (Erweitere Protokollierung) BZ7226 (Schallaufzeichnung)	2449853 2470188 Version 4.0.1 Version 4.0.1
Schallpegelanalysator Mikrofon Modulsoftware Modulsoftware Sekundärwindschirm	Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer U+P GmbH	2250 4189 + Primärwindschirm UA1650 BZ7225 (Erweitere Protokollierung) BZ7226 (Schallaufzeichnung)	2449850 2523754 Version 4.0.1 Version 4.0.1
Schallpegelanalysator Mikrofon Modulsoftware Modulsoftware Sekundärwindschirm	Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer Brüel & Kjaer U+P GmbH	2250 4189 + Primärwindschirm UA1650 BZ7225 (Erweitere Protokollierung) BZ7226 (Schallaufzeichnung)	3000515 2791610 Version 4.0.1 Version 4.0.1
Anemometer (WG) Datenlogger	Thies Brüel & Kjaer	4.3519.00.000 2238	0205334 2456983
Anemometer (WG) Datenlogger	Thies Brüel & Kjaer	4.3519.00.167 2238	03120641 2456982
Anemometer (WG) Datenlogger	Thies Thies	4.3519.00.141 MeteoLOG TDL14	0905827 9.1740.11.011
Anemometer (WG) Datenlogger	Thies Thies	4.3519.00.000 MeteoLOG TDL14	0106866 9.1740.11.010

Für die akustischen Messungen wurden die aufgeführten Geräte verwendet. Bei den Schallmessungen wird entsprechend der TA Lärm die Frequenzbewertung A und die Zeitbewertung F nach DIN EN 60651, Ausgabe Mai 1994, benutzt.

Die Schallpegelanalysatoren und die Kalibratoren erfüllen die Anforderungen der Klasse 1 nach IEC 651 und IEC 804 (Schallpegelmesser) bzw. IEC 942 (Kalibrator). Im Rahmen des Qualitätssicherungssystems nach DIN EN ISO/IEC 17025 erfolgt jährlich eine DAkKS-Kalibrierung durch ein zertifiziertes Unternehmen. Zwei Schallpegelanalysatoren vom Typ 2250 waren zur Zeit der Messungen amtlich geeicht. Die Kalibrierung der Messgeräte wurde vor und nach den Messungen mit Hilfe der Kalibratoren überprüft; Abweichungen wurden nicht festgestellt. Der Messfehler der Messketten wird nach DIN IEC 651 mit $< \pm 0,4$ dB (A) angegeben.



Die im Rahmen der Emissionsmessungen eingesetzten Messgeräte erfüllen die Anforderungen an die Mess- und Auswertegeräte nach der Norm DIN EN 61400-11. Im Rahmen des internen Qualitätssicherungssystems wird der Analysator in regelmäßigen Abständen durch Vergleichsmessungen mit den geeichten Geräten überwacht und kontrolliert. Die Kalibrierung des Analysators wurde vor und nach den Messungen mit Hilfe des Kalibrators überprüft; Abweichungen wurden nicht festgestellt.

Der Sekundärwindschirm auf der schallharten Platte ist ein von der Uppenkamp und Partner GmbH entwickeltes Produkt und besteht aus einem halbkugelförmigen Drahtrahmengestell mit einem Durchmesser von 600 mm. Das Rahmengestell ist überzogen mit einem 20 mm dicken, offenporigen Schaumstoff (4 - 8 Poren je 10 mm). Der Frequenzgang des Sekundärwindschirms wurde geprüft. Als Ergebnis dieser Prüfung ist für den ausgewerteten Frequenzbereich keinerlei Korrektur erforderlich. Die sekundären Windschirme an den Immissionsmesspunkten sind ebenfalls eine Eigenentwicklung. Es wurden Sekundärwindschirme mit einem Durchmesser von ca. 35 cm eingesetzt, die aus einem mit einem Nylongewebe bespannten Metallgerüst hergestellt wurden.

Die schallharte Platte ist als ebene, 3 mm dicke Aluminiumplatte mit einem Durchmesser von 1 m ausgebildet. Die Lage der Mikrofonskapsel auf der Platte ist entsprechend den Anforderungen der DIN EN 61400-11 eingestellt.

Informationen hinsichtlich des durch das IfL – Institut für Lärmschutz GmbH eingesetzten SODAR-RASS-Systems können dem Kapitel 4.3, dem Anhang D sowie dem im Anhang E.2 beigefügten Bericht [18] entnommen werden.

3.4 Dokumentierte Messgrößen und Anlagenparameter

Während der gesamten Messdauer in den Messnächten wurden die folgend gelisteten Messgrößen und Anlagenparameter mit der jeweils angegebenen Mittelungszeit synchron erfasst.

Tabelle 9 Akustische und nicht-akustische Messgrößen und Anlagenparameter

Messgröße / Anlagenparameter	EMPWEA1	EMPWEA2	IMPDW500	IMPDW750	IMPDW75015G	IMPDW75030G	IMPDW75045G	IMPDW1000
Schalldruckpegel in dB(A)	$t_m = 10 \text{ sec}$		$t_m = 10 \text{ sec}$					
Energieäquivalenter Mittelungspegel L_{Aeq}	X	X	X	X	X	X	X	X
Taktmaximalmittelungspegel (Taktzeit 5 s) L_{AFreq}	X	X	X	X	X	X	X	X
Frequenzbereich Terzpegel: 50 Hz – 5.000 Hz	X	X	X	X	X	X	X	X
Windgeschwindigkeit in m/s	$t_m = 10 \text{ sec}$		$t_m = 10 \text{ sec}$					
Signalgeber Messmast in 10 m Höhe v_{10m}	X	X						
Signalgeber in 5 m Höhe v_{5m}			X	X	X	X	X	X
in Nabenhöhe v_n	X	X						
Windrichtung in °	$t_m = 10 \text{ sec}$							
Signalgeber Messmast in 10 m Höhe	X	X						
Elektrische Leistung P in kW	$t_m = 10 \text{ sec}$							
Erfassung über die WEA-Anlagensteuerung	X	X						
Rotordrehzahl η_{Rotor} in rpm	$t_m = 10 \text{ sec}$							
Erfassung über die WEA-Anlagensteuerung	X	X						
Klimatische Messgrößen	$t_m = 10 \text{ sec}$							
Temperatur in °C	X	X						
Luftfeuchtigkeit in %	X	X						
Luftdruck in kPa	X	X						

Mittels des durch das IfL eingesetzten SODAR-RASS-Systems wurden jeweils 6-Minuten-Mittelwerte des Windvektors, der Windgeschwindigkeit, der Diffusionsklasse und der Temperatur über einen Höhenbereich von 30 m bis 300 m agl mit einer Höhengauflösung von 10 m erhoben. Nähere Informationen hierzu können dem Kapitel 4.3, dem Anhang D sowie dem im Anhang E.2 beigefügten Bericht [18] entnommen werden.

Die Betriebsparameter der Windenergieanlagen wurden über die mittels Kundenschnittstelle bereitgestellten Signalausgänge erfasst. Die Erfassung erfolgte in Form von DC-Strom- bzw. Spannungssignalen über zwei eingesetzte Datenlogger.



4 Auswertung der Messungen

4.1 Emissionsmessungen in Anlehnung an DIN EN 61400-11

4.1.1 A-bewerteter Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten

Die Messungen des A-bewerteten Schalldruckpegels an den Referenzmesspunkten erfolgten gleichzeitig mit der Messung der Windgeschwindigkeit. Die Messungen werden anhand der normierten Windgeschwindigkeit v_s den Windklassen (BINS) und im Anschluss der Zeitachse zugeteilt.

Aus den geloggtten Daten der elektrischen Wirkleistung werden unter Zuhilfenahme der vorgelegten Leistungskurve die Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe ermittelt und hinsichtlich Normalklimabedingungen nach Gleichung (5) der DIN EN 61400-11 korrigiert.

Anschließend erfolgt die Umrechnung der Windgeschwindigkeit nach Gleichung (7) unter Annahme eines logarithmischen Windprofils auf eine Referenzhöhe von 10 m. Die normierte Windgeschwindigkeit v_s oberhalb von 95 % Nennleistung wird aus einer direkt gemessenen Windgeschwindigkeit ermittelt⁷. Hierzu wird aufgrund der größeren Genauigkeit die Gondelanemometermethode nach der DIN EN 61400-11 herangezogen. Dazu wird aus den zwischen 5 % und 95 % der Nennleistung gemessenen Windgeschwindigkeiten des Gondelanemometers v_n und der korrigierten, aus der Leistung gewonnenen Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe v_H eine lineare Regression gebildet.

Die Ermittlung der normierten Windgeschwindigkeit während der Fremdgeräuschmessung (kein Anlagenbetrieb) erfolgt unter Hinzunahme der mittels Anemometer in 10 m Höhe gemessenen Werte unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors κ ⁸.

Alle gemessenen Schalldruckpegel werden hinsichtlich des Fremdgeräusches korrigiert. Mittelungspegel, die einen relevanten Fremdgeräuschanteil beinhalten, werden nicht zur Auswertung herangezogen.

Die Werte des Schalldruckpegels am Referenzmesspunkt für alle ganzzahligen Werte der normierten Windgeschwindigkeit v_s , im vorliegenden Fall von 4 ms^{-1} bis 7 ms^{-1} , werden aus einer Regressionsanalyse berechnet. Der Analyse werden alle auswertbaren und zulässigen Messwertpaare, die innerhalb des o. g. Windgeschwindigkeitsbereiches liegen, zugrunde gelegt.

⁷ Im vorliegenden Fall aufgrund der vorherrschenden Windgeschwindigkeiten und der damit verbundenen Leistung der WEA nicht relevant.

⁸ Der Korrekturfaktor κ wird als Verhältnis zwischen der in gleichen Messzeiträumen ermittelten normierten Windgeschwindigkeit v_s und der mit dem Anemometer in 10 m Höhe gemessenen Windgeschwindigkeit v_{10m} berechnet. Dieser Wert dient somit zur Korrektur der Windmessgröße hinsichtlich der für Gleichung (7) zugrunde gelegten Annahmen zum Windprofil und zur Rauigkeitslänge im Vergleich zu den tatsächlich vorliegenden Bedingungen.

4.1.2 Immissionsrelevante Schalleistungspegel

Der immissionsrelevante Schalleistungspegel $L_{WA,k}$ wird nach DIN EN 61400-11 aus dem bezüglich des Fremdgeräusches korrigierten Schalldruckpegel $L_{Aeq,c,k}$ am Referenzmesspunkt bei den ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten nach folgender Beziehung berechnet:

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_i^2}{S_0}\right) \text{ in dB(A)}$$

Hierbei ist:

- $L_{WA,k}$ immissionsrelevanter Schalleistungspegel
- $L_{Aeq,c,k}$ der unter Referenzbedingungen gemessene, bezüglich des Fremdgeräusches korrigierte, A-bewertete Schalldruckpegel bei den ganzzahligen Windgeschwindigkeitswerten
- R_i der diagonale Abstand vom Rotormittelpunkt zum Mikrofon am Referenzmesspunkt
- S_0 die Bezugsfläche von 1 m²

Um der wechselseitigen Beeinflussung der Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten durch die ortsnahen, parallele Vermessung zweier Windenergieanlagen Rechnung zu tragen, wurden im Vorfeld der jeweiligen Messungen die WEA abwechselnd betrieben und die Schalldruckpegel an beiden Emissionsmesspunkten dokumentiert.

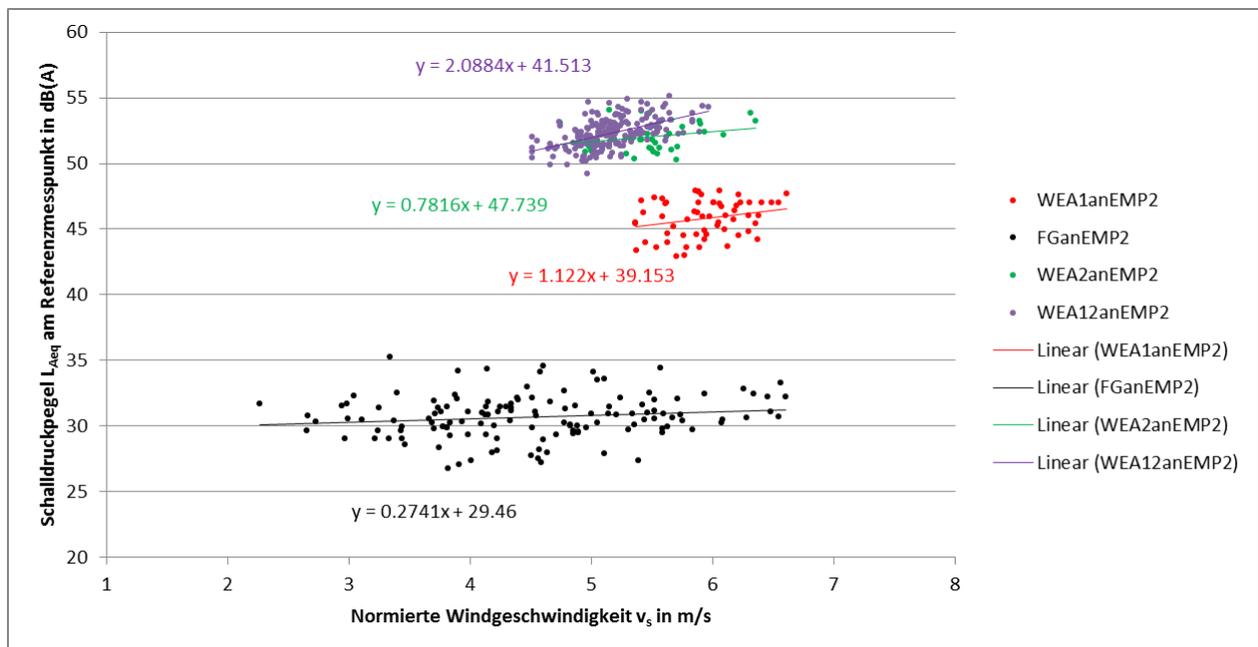


Abbildung 3 Schalldruckpegel am Referenzmesspunkt EMP2 (südl. WEA, 1. Messnacht)



Im vorliegenden Beispiel zeigen die Messwerte, dass am Referenzmesspunkt der südlichen WEA der Schalldruckpegel der südlichen WEA mehr als 8 dB oberhalb des Schalldruckpegels der nördlichen WEA liegt.

Die Ermittlung der Schalleistungspegel $L_{WA,vs}$ der beiden WEA erfolgt im Anschluss unter Berücksichtigung der erhobenen Messwerte im Rahmen des wechselseitigen Betriebes sowie der normierten Windgeschwindigkeit v_s in m/s im jeweiligen Messintervall, hier beispielhaft für den Schalleistungspegel der südlichen WEA dargestellt:

$$L_{WA,vs,WEA2} = 10 \log \left[10^{0.1 \cdot L_{Aeq,vs,WEA2,EMP2}} - 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,vs,WEA1,EMP2}} - 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,vs,FG,EMP2}} \right] - 6 + 10 \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_1^2}{s_0} \right) \text{ in dB(A)}$$

Hierbei ist:

- $L_{WA,vs,WEA2}$ immissionsrelevanter Schalleistungspegel der WEA2 bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten v_s
- $L_{Aeq,vs,WEA12,EMP2}$ Schalldruckpegel des Gesamtgeräusches am Referenzmesspunkt 2, verursacht durch den Betrieb beider WEA, als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
- $L_{Aeq,vs,WEA1,EMP2}$ Schalldruckpegel des Gesamtgeräusches am Referenzmesspunkt 2, verursacht durch den Betrieb der WEA1, als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
- $L_{Aeq,vs,FG,EMP2}$ Schalldruckpegel des Fremdgeräusches am Referenzmesspunkt 2 als lineare Regression des Schalldruckes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v_s
- R_1 der diagonale Abstand vom Rotormittelpunkt zum Mikrofon am Referenzmesspunkt
- s_0 die Bezugsfläche von 1 m²

Aufgrund der jeweils in engen Grenzen vorgefundenen Windgeschwindigkeiten innerhalb der einzelnen Messnächte, ist die beschriebene Berücksichtigung sämtlicher Geräuschanteile mittels linearer Regression durchführbar.

Der diagonale Abstand R_1 vom Rotormittelpunkt zum Mikrofon am Referenzmesspunkt ergibt sich für die jeweils gewählte Position der schallharten Platte zu

Tabelle 10 Abstände R_1 , Emissionsmessungen WEA 1 und WEA 2

Emissionsmessung WEA 1 und WEA 2					
Messnacht	1	2	3	4	5
Abstand R_1 in m (WEA 1/WEA2)	165 / 165	165 / 166	163 / 166	165 / 134	159 / 164

Die immissionsrelevanten Schalleistungspegel $L_{WA,vs}$ für die berücksichtigte Leistungskurve sind nachfolgend zusammengefasst.



Tabelle 11 Immissionsrelevante Schallleistungspegel der untersuchten Windenergieanlagen

	1. Messnacht $v_s = 5.1 \pm 0.2 \text{ m/s}$		2. Messnacht $v_s = 5.7 \pm 0.2 \text{ m/s}$		3. Messnacht $v_s = 5.9 \pm 0.4 \text{ m/s}$		4. Messnacht $v_s = 5.1 \pm 0.1 \text{ m/s}$		5. Messnacht $v_s = 4.7 \pm 0.2 \text{ m/s}$	
	WEA 1	WEA 2								
Immissionsrelevanter Schallleistungspegel ⁽¹⁾ $L_{WA,vs}$ in dB(A)	101.5	100.9	103.5	101.5	103.2	102.1	101.6	101.8	100.6	99.1

(1) korrigiert hinsichtlich der wechselseitigen Beeinflussung der Emissionsmessungen

Bei den genannten Schallleistungspegeln (sowie der genannten Windgeschwindigkeit v_s) handelt es sich um den energetischen (arithmetischen) Mittelwert aus allen relevanten Datensätzen. Im Rahmen der weitergehenden Berechnungen werden die Schallleistungspegel unter Berücksichtigung der jeweiligen Windgeschwindigkeit v_s für jedes 10-sec Messintervall ermittelt und in der weitergehenden Auswertung berücksichtigt. Der o. g. Schallleistungspegel fließt im Nachgang als Emissionsansatz in die Ausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 ein.

Die energetische Pegelmittelwertbildung über die einzelnen Messungen wurde für die Eingangsdatenermittlung der DIN ISO 9613-2-Berechnungen herangezogen, da eine Differenzierung in unterschiedliche BINS aufgrund der nur geringfügig abweichenden Windgeschwindigkeiten v_s im Rahmen der einzelnen Messungen nicht erforderlich ist. Angaben zur Zuordnung der immissionsrelevanten Schallleistungspegel hinsichtlich der Zeitachse sowie die weitere Berechnungsdokumentation bzw. grafische Darstellungen können dem Anhang A und den beigefügten digitalen Tabellen (Anhang E) entnommen werden. Das Oktavspektrum des immissionsrelevanten Schallleistungspegels der Windenergieanlagen stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 12 Oktavspektrum der Schallleistungspegel

WEA	Oktav-Schallleistungspegel $L_{WA,OkT}$ in dB(A) für die Oktavmittelfrequenzen							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
1 – Nord	81.9	92.3	98.2	97.0	93.3	88.5	82.5	69.2
2- Süd	83.3	89.9	96	96.9	93.4	88.6	84.4	70.3

4.2 Immissionsmessungen gemäß DIN 45645-1

Die Immissionsmessungen an den Immissionsmesspunkten im Mitwindbereich erfolgten synchron zu den Emissionsmessungen. An allen Messpunkten wurde neben den akustischen Messungen des Gesamtgeräusches $L_{Aeq,GG,IMP}$ in dB(A) bzw. des Fremdgeräusches $L_{Aeq,FG,IMP}$ in dB(A) die Windgeschwindigkeit dokumentiert. Die Messungen wurden in einer Höhe von 4 m (Akustik) bzw. ca. 5 m (Windgeschwindigkeit) mit einer Mittelungszeit von 10 Sekunden durchgeführt.

In einem ersten Auswertungsschritt werden die im Rahmen der Gesamtgeräuschmessungen sowie der Fremdgeräuschmessungen erhobenen akustischen Messwerte eines jeden Immissionsmesspunktes, $L_{Aeq,GG,IMP}$ in dB(A) bzw. $L_{Aeq,FG,IMP}$ in dB(A), als Funktion der immissionsseitigen Windgeschwindigkeit in 5 m Höhe v_{5m} in m/s und daraus resultierend als lineare Regression dargestellt. Hierbei werden durch weitere Geräusche (z. B. vorbeifahrende Kfz) beeinflusste Daten verworfen.

Die Berechnung des anlagenverursachten Schalldruckpegels an den Immissionspunkten, $L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}$ in dB(A) erfolgt unter Zuhilfenahme der emissionsseitig erhobenen Messwerte bzw. der daraus berechneten Schalleistungspegel $L_{WA,WEA}$ in dB(A), der geometrischen Abstandsämpfung A_{div} bezogen auf den Abstand zwischen der jeweiligen WEA und dem Immissionsmesspunkt sowie einer Ausbreitungskonstanten D_{konst} unter Berücksichtigung des folgenden Zusammenhangs:

$$L_{Aeq,AG,IMP,berechnet} = 10 \log \left[10^{0.1 \cdot (L_{WA,WEA1} - A_{div,WEA1} - D_{konst})} + 10^{0.1 \cdot (L_{WA,WEA2} - A_{div,WEA2} - D_{konst})} \right] \text{ in dB(A)}$$

Hierbei ist:

$L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}$	der berechnete Anlagengeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A)
$L_{WA,WEA1/2}$	berechneter Schalleistungspegel der WEA 1 bzw. WEA 2 in dB(A)
$A_{div,WEA1/2}$	geometrische Abstandsämpfung A_{div} bezogen auf den Abstand zwischen der jeweiligen WEA und dem Immissionsmesspunkt in dB
D_{konst}	Konstante für die Ausbreitungsbedingungen der Windenergieanlagen Geräusche in dB

Die Ausbreitungskonstante D_{konst} beschreibt hierbei im Wesentlichen die über die geometrische Ausbreitung hinausgehende Dämpfung aufgrund unterschiedlicher Faktoren (z. B. Meteorologie).

Sie wird dabei iterativ mit der Maßgabe einer, nach der folgenden Gleichung zu bestimmenden, minimal werdenden quadratischen Abweichung der Kenngröße ΔL_k in dB des berechneten und gemessenen Gesamtgeräusches am Immissionsmesspunkt über alle Gesamtgeräuschmesswerte bestimmt.

$$\Delta L_k = L_{Aeq,GG,IMP,berechnet} - L_{Aeq,GG,IMP,gemessen} \quad \text{in dB}$$



Hierbei ist:

ΔL_k Differenz der berechneten und gemessenen Gesamtgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB
 $L_{Aeq,GG,IMP,berechnet}$ der berechnete Gesamtgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A)
 $L_{Aeq,GG,IMP,gemessen}$ der gemessene Gesamtgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A)

Der berechnete Pegel des am Immissionsort auftretenden Gesamtgeräusches, $L_{Aeq,GG,IMP,berechnet}$ in dB(A) setzt sich dabei entsprechend der folgenden energetischen Addition aus dem am Immissionsort gemessenen Fremdgeräuschpegel sowie dem durch die WEA verursachten, hier unter Berücksichtigung des Emissionsverhaltens sowie einer Ausbreitungskonstante berechneten, Anlagengeräuschpegels zusammen:

$$L_{Aeq,GG,IMP,berechnet} = 10 \log[10^{0.1 \cdot L_{Aeq,FG,IMP,Regression}} + 10^{0.1 \cdot L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}}] \quad \text{in dB}$$

Hierbei ist:

$L_{Aeq,GG,IMP,berechnet}$ der berechnete Gesamtgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A)
 $L_{Aeq,FG,IMP,Regression}$ der Fremdgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A), bestimmt aus lin. Regression
 $L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}$ der berechnete Anlagengeräuschpegel am Immissionsmesspunkt in dB(A)

Der Fremdgeräuschpegel am Immissionsmesspunkt, $L_{Aeq,FG,IMP,Regression}$ in dB(A), wird hierbei näherungsweise durch die berechneten Regressionen beschrieben.

An den Immissionsorten berechnen sich die durch die WEA verursachten Schalldruckpegel $L_{Aeq,AG,IMP,berechnet}$ in dB(A) sowie die Mittelwerte der (quadratischen) Differenzen der berechneten und gemessenen Gesamtgeräuschpegel über alle Messwerte zu den nachfolgend dargestellten Werten.

Der beschriebene Rechengang kann, differenziert nach den unterschiedlichen Immissionsmesspunkten, der digitalen Dokumentation (Anhang E) entnommen werden. Die Diagramme der Messwerte der Gesamtgeräuschpegel, der Fremdgeräuschpegel sowie die berechneten Anlagengeräuschpegel an den Immissionspunkten und die zugehörigen Oktavspektren können dem Anhang B entnommen werden.

Tabelle 13 Ergebnisse der berechneten Anlagengeräuschpegel $L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A) an den Immissionsmesspunkten

Erweiterte Hauptuntersuchung Immissionspunkt	$L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A)	s in dB	D_{konst} in dB	$A_{div,WEA1}$ in dB	$A_{div,WEA2}$ in dB	$\overline{(\Delta L_k)^2}$ in dB
DW500 (495 m,0°)	41.6	0.8	-2.5	64.3	66.3	0.5
DW500 (534 m,0°)	43.9	0.5	-3.2	63.7	67.5	0.3
DW500 (496 m,-5°)	43.2	0.8	-2.7	64.6	66.1	0.6
DW500 (525 m,5°)	41.4	0.5	-1.5	63.1	67.5	0.3
DW500 (518 m,-5°)	41.0	0.5	-2.5	63.2	67.3	0.4
DW750 (756 m,0°)	37.1	0.8	-1.5	68.1	69.4	1.0
DW750 (783 m,-5°)	40.0	0.5	-2.8	67.5	70.3	1.4
DW750 (746 m,10°)	39.0	0.8	-2.0	68.5	68.8	1.1
DW750 (732 m,10°)	40.3	0.5	-3.6	66.7	69.8	0.9
DW750 (709 m,-5°)	36.1	0.5	-0.6	66.4	69.6	0.4
DW75015G (732 m,15°)	36.2	0.9	-0.5	68.3	68.7	0.8
DW75015G (766 m,10°)	41.0	0.5	-3.8	67.6	69.9	0.7
DW75015G (717 m,25°)	41.0	0.9	-3.7	68.6	68.1	0.9
DW75015G (750 m,15°)	38.8	0.5	-2.4	67.0	69.9	0.6
DW75015G (702 m,10°)	36.8	0.5	-1.5	66.7	69.3	0.8
DW75030G (738 m,35°)	33.9	0.9	1.8	68.9	68.3	0.6
DW75030G (798 m,35°)	37.6	0.6	-1.0	68.6	69.8	0.7
DW75030G (724 m,40°)	39.3	0.9	-2.0	69.1	67.7	1.1
DW75030G (756 m,30°)	36.8	0.6	-0.6	67.4	69.9	0.8
DW75030G (765 m,35°)	33.6	0.5	0.7	68.2	69.5	0.8
DW75045G (730 m,50°)	34.0	0.9	1.8	69.1	67.8	0.7
DW75045G (859 m,45°)	36.3	0.6	-0.5	69.6	70.1	0.9
DW75045G (737 m,50°)	k.A.	k.A.	k.A.	69.4	67.6	k.A.
DW75045G (782 m,45°)	34.5	0.6	1.3	68.2	69.8	0.8
DW75045G (731 m,50°)	34.4	0.6	0.1	68.2	68.8	0.5
DW1000 (987 m,5°)	35.3	0.8	-2.0	70.6	71.4	1.6
DW1000 (1056 m,-10°)	35.1	0.5	-0.7	70.4	72.5	0.6
DW1000 (882 m,15°)	37.7	0.8	-2.0	69.8	70.3	1.1
DW1000 (1010 m,10°)	37.1	0.6	-3.3	69.9	72.2	1.0
DW1000 (1123 m,0°)	31.6	0.5	-0.4	71.1	72.9	1.2

4.3 Meteorologische Messungen mittels SODAR-RASS

Mittels des durch die IfL – Institut für Lärmschutz GmbH eingesetzten SODAR-RASS-Systems wurden jeweils 6-Minuten-Mittelwerte des Windvektors, der Windgeschwindigkeit, der Diffusionsklasse und der Temperatur über einen Höhenbereich von 30 m bis 300 m agl mit einer Höhenauflösung von 10 m erhoben. Die meteorologische Situation kann nach [18] demnach in den Messnächten wie folgt beschrieben werden.

Tabelle 14 Wettersituation erweiterte Hauptuntersuchung 2013 [18]

Messnacht	Wind (30 m)	Wind (>200 m)	Temperatur	Diffusitätsklassen 30m/300m	Sigma des Vertikalwindes (Turbulenz)
1	5.0 m/s 220°	11.0 m/s 245°	9 °C	„D“ / „B“	0.2 – 1.0 m/s
2	4.5 m/s 190°	14.0 m/s 190°	9 °C	„D“ / „A“	0.0 – 0.6 m/s
3	6.0 m/s 240°	13.5 m/s 240°	8 °C	„D“ / „B“	0.8 – 1.0 m/s
4	5.0 m/s 180°	12.0 m/s 195°	7 °C	„D“ / „A“	0.4 – 0.7 m/s
5	3.0 m/s 190°	8.0 m/s 220°	6 °C	„E“ / „C“	0.2 – 1.1 m/s

Detaillierte Informationen hierzu können dem beigefügten Bericht [18] sowie den grafischen Darstellungen im Anhang D entnommen werden.



4.4 Messunsicherheiten

4.4.1 Emissionsmessungen in Anlehnung an die DIN EN 61400-11

Die Messunsicherheit der akustischen Parameter wird nach DIN EN 61400-11, Anhang D, angegeben. Abweichend hiervon werden die Unsicherheitsfaktoren \mathbf{U}_A (statistischer Anteil) und \mathbf{U}_{B9} (Fremdgeräuschkorrektur) nach den Technischen Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 1 (Revision 18), bestimmt. Der Messunsicherheitsanteil \mathbf{U}_A ist die Standardabweichung der Regressionswerte. Er berechnet sich durch:

$$\mathbf{U}_A = \sqrt{\frac{\sum (\mathbf{y} - \mathbf{y}_{\text{abgeschätzt}})^2}{\mathbf{N} \cdot (\mathbf{N} - 2)}} \text{ in dB}$$

Hierbei ist:

$\mathbf{y}_{\text{abgeschätzt}}$	der bei gleicher Windgeschwindigkeit aus der Regressionsanalyse abgeschätzte Schalldruckpegel
\mathbf{y}_i	der tatsächlich gemessene Schalldruckpegel
\mathbf{N}	die Anzahl der in die Regressionsanalyse einbezogenen Messwerte

Die Bestimmung des Unsicherheitsanteils erfolgt für die Gesamtgeräusche ($\mathbf{U}_{A,s+n}$) und für die Fremdgeräusche ($\mathbf{U}_{A,n}$) getrennt für jede Windklasse.

Der Einfluss der Fremdgeräuschkorrektur auf die Messunsicherheit wird in Form eines Unsicherheitsanteils des fremdgeräusch-bereinigten Anlagenpegels \mathbf{L}_s auf der Grundlage der Unsicherheitsanteile für die per Regression abgeschätzten Gesamt- und Fremdgeräuschpegel $\mathbf{U}_{A,s+n}$ und $\mathbf{U}_{A,n}$ wie folgt bestimmt:

$$\mathbf{U}_{A,s} = \frac{\sqrt{(\mathbf{U}_{A,s+n} \cdot 10^{0,1 \cdot \mathbf{L}_{s+n}})^2 + (\mathbf{U}_{A,n} \cdot 10^{0,1 \cdot \mathbf{L}_n})^2}}{10^{(0,1 \cdot \mathbf{L}_s)}} \text{ in dB}$$

Hierbei ist:

\mathbf{L}_{s+n}	der Gesamtgeräuschpegel in dB(A)
\mathbf{L}_n	der Fremdgeräuschpegel in dB(A)
\mathbf{L}_s	der fremdgeräusch-bereinigte Anlagenpegel in dB(A)

Die Werte der Unsicherheitsanteile $\mathbf{U}_{A,s}$ ergeben sich aus den Messungen zu Werten zwischen $\mathbf{U}_{A,s} = 0.05$ dB und $\mathbf{U}_{A,s} = 0.61$ dB.

Die Messunsicherheitsparameter \mathbf{U}_{Bn} beziehen sich auf

- die Kalibrierung und die Toleranzen der Messkette (\mathbf{U}_{B1} und \mathbf{U}_{B2}),
- Unsicherheiten in den akustischen Bedingungen für die schallharte Platte (\mathbf{U}_{B3}),
- Unsicherheiten bezüglich der Abstandsmessungen (\mathbf{U}_{B4}),



- Unsicherheiten in der akustischen Impedanz der Luft (U_{B5}),
- Unsicherheiten in der Geräuschabstrahlung der WEA aufgrund sich ändernder Witterungsbedingungen (U_{B6}),
- Unsicherheiten in der gemessenen Windgeschwindigkeit einschließlich der Anemometerkalibrierung und Standorteinflüsse sowie in der errechneten Windgeschwindigkeit einschließlich der Unsicherheit in der Leistungskurve (U_{B7}),
- Unsicherheiten in der Windrichtungsmessung (U_{B8}).

Für die Parameter U_{B1} bis U_{B8} werden die in der Tabelle D.1 der DIN EN 61400-1, Anhang D, aufgeführten typischen möglichen Werte angesetzt. Der systematische Unsicherheitsanteil U_{B9} entfällt nach den Technischen Richtlinien für Windenergieanlagen, Teil 1 (Rev. 18).

Die kombinierte Gesamtmessunsicherheit berechnet sich bei dieser Betrachtung aus der Wurzel der Summe aller quadrierten Einzelkomponenten:

$$U_C = \sqrt{U_{A,s}^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2 + U_{B4}^2 + U_{B5}^2 + U_{B6}^2 + U_{B7}^2 + U_{B8}^2} \text{ in dB}$$

Für die untersuchten Windklassen berechnet sich die Gesamtunsicherheit U_C zu Werten zwischen $U_C = 1.1$ dB und $U_C = 1.3$ dB.

4.4.2 Immissionsmessungen gemäß DIN 45645-1

Die Messungen wurden unter Beachtung der Bestimmungen der DIN 45645-1, Abschnitte 6.2 bis 6.5, durchgeführt. Zur Angabe der Messunsicherheit bei der Beurteilung der Geräuschimmissionen wird in der DIN 45645-1 im Regelfall auf die VDI-Richtlinie 3723 verwiesen.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Abstände zwischen den Emissionsquellen und den Messorten von ca. 350 m bis ca. 1.100 m sind für bodennahe Quellen meteorologisch bedingte Pegelschwankungen nach Tabelle 2 der VDI-Richtlinie 3723-1 zu erwarten. Der Vertrauensbereich der Messungen wird nach dem unter Ziffer 5.1.2 dieser Richtlinie beschriebenen Verfahren ermittelt.

5 Ausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2

5.1 Grundlagen

Die Ausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2 stellen auf Basis der messtechnisch ermittelten Schalleistungspegel der untersuchten Windenergieanlagen den zweiten Teil der Untersuchung der Ausbreitungsbedingungen für die Geräusche von hohen Windenergieanlagen dar.

Unter Berücksichtigung des allgemeinen Berechnungsverfahrens sowie des alternativen Berechnungsverfahrens der DIN ISO 9613-2 erfolgt ein Vergleich der messtechnisch erhobenen Geräuschpegel an den Immissionsmesspunkten im Untersuchungsbereich (Mitwind) mit den rechnerisch auf Grundlage beider Berechnungsverfahren erhaltenen Werten.

Zur Berechnung der Geräuschimmissionen wird das Programmsystem SAOS-NP der Kramer Software GmbH, St. Augustin, in seiner aktuellen Softwareversion (2012.03) verwendet. Das Berechnungsverfahren berechnet den äquivalenten Dauerschalldruckpegel $L_{AT}(DW)$ in dB(A) entsprechend der DIN ISO 9613-2:

$$L_{AT}(DW) = L_W + D_C + A \quad \text{in dB(A)}$$

Hierbei ist:

- $L_{AT}(DW)$ der A-bewertete Mitwindpegel am Immissionsort
- L_W der Schalleistungspegel der Geräuschquelle
- D_C die Richtwirkungskorrektur (= 0 dB)
- $A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar}$
- A_{div} die Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung
- A_{atm} die Dämpfung aufgrund von Luftabsorption
- A_{gr} die Dämpfung aufgrund des Bodeneffektes
- A_{bar} die Dämpfung aufgrund von Abschirmung

Weiterhin werden den Berechnungen die jeweils vorherrschenden Temperaturen und Luftfeuchtigkeitswerte entsprechend den Bedingungen während des Messzeitraumes zugrunde gelegt.

Nähere Erläuterungen zu den Berechnungsverfahren, die sich maßgeblich durch die unterschiedliche Berechnung der Bodendämpfung A_{gr} differenzieren, können dem folgenden Abschnitt 5.2 entnommen werden.

Da es ein wesentliches Ziel der Untersuchung ist, die messtechnisch unter Mitwindbedingungen erfassten Schalldruckpegel mit den nach DIN ISO 9613-2 berechneten Mitwind-Pegeln zu vergleichen, wird im Rahmen der Ausbreitungsberechnungen keine meteorologische Korrektur angewendet.



5.2 Berechnungsverfahren

5.2.1 Allgemeines Berechnungsverfahren

Die Schallausbreitungsberechnung wird mit Oktav-Schallpegeln im Frequenzbereich von 63 Hz bis 8.000 Hz durchgeführt. Weiterhin werden die akustischen Eigenschaften des Bodenbereiches im Untersuchungsgebiet durch den Bodenfaktor **G** berücksichtigt, wobei nach DIN ISO 9613-2 folgende Werte zu vergeben sind:

Harter Boden G = 0	Mischboden	poröser Boden G = 1
---------------------------	------------	----------------------------

Erläuterungen hierzu aus DIN ISO 9613-2

Hierzu gehören Straßenpflaster, Wasser, Eis, Beton und jede andere Bodenoberfläche geringer Porosität. Festgestampfter Boden z. B., wie er oft um Industriegelände herum vorkommt, kann als hart betrachtet werden.

Besteht die Oberfläche sowohl aus hartem wie aus porösem Boden, so nimmt G einen Wert zwischen 0 und 1 an. Der Wert ist der Anteil porösen Bodens.

Hierzu zählen von Gras, Bäumen oder anderem Bewuchs bedeckte Böden sowie jede andere Bodenoberfläche, die für Pflanzenwachstum geeignet ist, z. B. Ackerland

Im vorliegenden Fall wird das Untersuchungsgebiet, den realen Bedingungen entsprechend, mit einem Bodenfaktor von **G = 1** sowie im Rahmen weiterer Betrachtungen zu Vergleichszwecken mit **G = 0** berücksichtigt.

Die Bodendämpfung **A_{gr}** wird im Folgenden für ein bestimmtes Oktavband berechnet. Sie ergibt sich aus drei Teilen:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m$$

Hierbei ist:

- A_s** die Dämpfung für den Quellbereich, gekennzeichnet durch den Bodenfaktor **G_s**
- A_r** die Dämpfung für den Empfangsbereich, gekennzeichnet durch den Bodenfaktor **G_r**
- A_m** die Dämpfung für den Mittelbereich, gekennzeichnet durch den Bodenfaktor **G_m**

5.2.2 Alternatives Verfahren zur Berechnung A-bewerteter Schalldruckpegel

Wenn der Schall sich über porösem oder gemischtem (jedoch überwiegend porösem) Boden ausbreitet, nur der A-bewertete Schalldruckpegel am Immissionspunkt von Interesse ist und der Schall kein reiner Ton ist, kann die Bodendämpfung **A_{gr}** im Rahmen des allgemeinen Berechnungsverfahrens berechnet werden nach:



$$A_{gr} = 4.8 \cdot \frac{2 \cdot h_m}{d} \left[17 + \frac{300}{d} \right] \geq 0 \text{ dB}$$

Hierbei ist:

- h_m** die mittlere Höhe des Schallausbreitungsweges über dem Boden in m
- d** der Abstand von der Schallquelle zum Empfänger in m

Die Schallausbreitungsberechnung erfolgt mit A-bewerteten Einzelgrößen (500 Hz Oktave). Eine gesonderte Vergabe eines Bodenfaktors ist nicht durchzuführen.

5.3 Qualität der Prognose

Die Dämpfung von Schall, der sich im Freien zwischen einer Schallquelle und einem Aufpunkt ausbreitet, fluktuiert aufgrund der Schwankungen in den Witterungsbedingungen auf dem Ausbreitungsweg sowie durch Dämpfung oder Abschirmung des Schalls durch Boden, Bewuchs und Hindernisse.

Die geschätzten Genauigkeitswerte beschränken sich auf den Bereich der Bedingungen, die für die Gültigkeit der entsprechenden Gleichungen der DIN ISO 9613-2 festgelegt sind (werden hier im Einzelnen nicht aufgeführt), und sind unabhängig von Unsicherheiten in der Bestimmung der Schallemissionswerte. Für das Prognoseverfahren der DIN ISO 9613-2 wird eine geschätzte Unsicherheit für die Berechnung der Immissionspegel $L_{AT}(DW)$ unter Anwendung der Gleichungen 1 bis 10 mit breitbandig emittierenden Geräuschquellen angegeben. Die Unsicherheit wird in Abhängigkeit der mittleren Höhe von Schallquelle und Immissionsort in Tabelle 5 der Norm wie folgt beziffert:

Tabelle 15 Geschätzte Genauigkeit DIN ISO 9613-2

mittlere Höhe von Quelle und Immissionsort in m	Geschätzte Genauigkeit bei einem Abstand zwischen Quelle und Empfänger von 100 m < d < 1000 m in dB
5 < h < 30	± 3

Bei einem Prognoseverfahren der Genauigkeitsklasse 2 kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schätzung der Unsicherheit auf einen Bereich von ± 2 Standardabweichungen bezieht. Somit entspricht die Genauigkeitsschätzung der DIN ISO 9613-2 einer Standardabweichung σ_{Prog} von 1,5 dB. Unter Berücksichtigung der Standardnormalvariable $z = 1,28$ dB bei einer 10%igen Irrtumswahrscheinlichkeit ergibt sich die obere Vertrauensbereichsgrenze hinsichtlich der Unsicherheit des Prognoseverfahrens zu 1,9 dB.

Im vorliegenden Fall werden die nach dem allgemeinen bzw. alternativen Berechnungsverfahren der DIN ISO 9613-2 rechnerisch ermittelten Immissionspegel als Grundlage der nachfolgenden Betrachtungen herangezogen. Es erfolgt keine Berücksichtigung von σ_{Prog} .



5.4 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten der Berechnungen dienen die messtechnisch ermittelten und hinsichtlich der wechselseitigen Beeinflussung der parallelen Emissionsmessung korrigierten Schalleistungspegel der WEA.

Als Vergleichswerte werden die mit den Schalleistungspegeln zeitsynchron ermittelten und auf Grundlage der Messergebnisse berechneten Anlagengeräuschpegel an den Immissionsmesspunkten $L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A) herangezogen.

Tabelle 16 Eingangsdaten zum rechnerischen Vergleich der Schallausbreitung (erweiterte Hauptuntersuchung 2013)

Messnacht	Immissionsrel. Schalleistungs-pegel		Auf Grundlage der Messergebnisse berechnete Schalldruckpegel des Anlagengeräusches an den Immissionsmesspunkten					
	$L_{WA,k}$ in dB(A)		$L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A)					
	WEA1	WEA2	IMPDW500	IMPDW750	IMPDW75015G	IMPDW75030G	IMPDW75045G	IMPDW1000
1	101.5	100.9	41.6	37.1	36.2	33.9	34.0	35.3
2	103.5	101.5	43.9	40.0	41.0	37.6	36.3	35.1
3	103.2	102.1	43.2	39.0	41.0	39.3	k.A.	37.7
4	101.6	101.8	41.4	40.3	38.8	36.8	34.5	37.1
5	100.6	99.1	41.0	36.1	36.8	33.6	34.4	31.6

Neben den im Rahmen der gegenständlichen erweiterten Hauptuntersuchung erhobenen Messdaten werden, unter Berücksichtigung des aktuell beschriebenen Verfahrens⁹ der Auswertung, sämtliche Daten aus der Hauptuntersuchung 2012 in den gegenständlichen Auswertungen mit berücksichtigt, um die Datendichte zu erhöhen.

Tabelle 17 Eingangsdaten zum rechnerischen Vergleich der Schallausbreitung (Hauptuntersuchung 2012)

Messnacht	Immissionsrel. Schalleistungs-pegel		Auf Grundlage der Messergebnisse berechnete Schalldruckpegel des Anlagengeräusches an den Immissionsmesspunkten					
	$L_{WA,k}$ in dB(A)		$L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A)					
	WEA1	WEA2	IMPDW500	IMPDW750	IMPDW1000	IMPUW500	IMPUW750	IMPUW1000
6 ⁽¹⁾	99.3	99.6	38.4	35.4	34.1	39.3	35.3	k.A.
7 ⁽¹⁾	97.4	97.6	36.4	34.9	32.8	36.3	30.6	28.4
8 ⁽¹⁾	97.0	94.3	37.6	33.0	29.6	36.0	k.A.	k.A.
9 ⁽¹⁾	95.2	99.6	40.6	38.6	37.5	37.4	34.0	31.3
10 ⁽¹⁾	102.2	101.1	42.5	40.1	38.3	43.3	36.6	33.4

(1) Messnächte Nr. 1, Nr. 3, Nr. 4, Nr. 5, Nr. 6 der Hauptuntersuchung im Jahre 2012

⁹ Die entsprechenden Berechnungen können der digitalen Dokumentation im Anhang E.1 entnommen werden.

5.5 Ergebnisse der Ausbreitungsberechnungen und Vergleich

Die nach dem alternativen und dem frequenzselektiven Verfahren der DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel L_{AT} in dB(A) an den Immissionsmesspunkten (Höhe: 4 m) sind auf Grundlage der genannten Schallleistungspegel der WEA als energetische Summe der Schalldruckpegel L_{AT} in dB(A) beider Windenergieanlagen in der nachfolgenden Tabelle den auf Grundlage der durchgeführten Messungen rechnerisch ermittelten Schalldruckpegel der Anlagengeräusche $L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A) gegenübergestellt.

Tabelle 18 Berechnete Immissionspegel an den Immissionsmesspunkten

Immissionsort	Immissionsmessungen DIN 45645-1	Alternatives Verfahren DIN ISO 9613-2	Frequenzsel. Verfahren DIN ISO 9613-2 mit G=1	Frequenzsel. Verfahren DIN ISO 9613-2 mit G=0
	$L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A)	L_{AT} in dB(A)	L_{AT} in dB(A)	L_{AT} in dB(A)
1. Messnacht				
LAeq,DW500 (495 m,0°)	41.6	40.1	37.2	41.1
LAeq,DW750 (756 m,0°)	37.1	34.8	33.2	37.1
LAeq,DW75015G (732 m,15°)	36.2	35.0	33.4	37.4
LAeq,DW75030G (738 m,35°)	33.9	34.9	33.3	37.2
LAeq,DW75045G (730 m,50°)	34.0	35.1	33.5	37.4
LAeq,DW1000 (987 m,5°)	35.3	31.5	30.5	34.5
2. Messnacht				
LAeq,DW500 (534 m,0°)	43.9	42.3	39.0	42.9
LAeq,DW750 (783 m,-5°)	40.0	36.8	35.0	39.0
LAeq,DW75015G (766 m,10°)	41.0	36.8	35.0	39.0
LAeq,DW75030G (798 m,35°)	37.6	35.7	34.2	38.2
LAeq,DW75045G (859 m,45°)	36.3	34.6	33.3	37.3
LAeq,DW1000 (1056 m,-10°)	35.1	32.9	33.9	35.9
3. Messnacht				
LAeq,DW500 (496 m,-5°)	43.2	41.4	38.6	42.5
LAeq,DW750 (746 m,10°)	39.0	36.2	34.7	38.7
LAeq,DW75015G (717 m,25°)	41.0	36.7	35.1	39.0
LAeq,DW75030G (724 m,40°)	39.3	36.6	35.0	39.0
LAeq,DW75045G (737 m,50°)	k.A.	36.5	34.9	38.9
LAeq,DW1000 (882 m,15°)	37.7	34.3	33.1	37.1
4. Messnacht				
LAeq,DW500 (525 m,5°)	41.4	41.5	38.1	42.0
LAeq,DW750 (732 m,10°)	40.3	36.5	34.5	38.5
LAeq,DW75015G (750 m,15°)	38.8	36.1	34.2	38.2
LAeq,DW75030G (756 m,30°)	36.8	35.7	33.9	38.0
LAeq,DW75045G (782 m,45°)	34.5	34.9	33.4	37.5
LAeq,DW1000 (1010 m,10°)	37.1	32.2	32.5	35.2

Immissionsort	Immissions- messungen DIN 45645-1 $L_{Aeq,AG,IMP}$ in dB(A)	Alternatives Verfahren DIN ISO 9613-2 L_{AT} in dB(A)	Frequenzsel. Verfahren DIN ISO 9613-2 mit G=1 L_{AT} in dB(A)	Frequenzsel. Verfahren DIN ISO 9613-2 mit G=0 L_{AT} in dB(A)
10. Messnacht				
Lp,DW500 (487 m, 45°)	42.5	40.9	37.9	41.8
Lp,DW750 (757 m, 45°)	40.1	35.2	33.7	37.7
Lp,DW1000 (997 m, 45°)	38.3	31.8	30.8	34.9
Lp,UW500 (373 m, 225°)	43.3	43.5	39.9	43.8
Lp,UW750 (718 m, 225°)	36.6	35.7	34.0	38.0
Lp,UW1000 (938 m, 225°)	33.4	32.4	31.4	35.4



6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

6.1 Vergleich der messtechnischen und rechnerischen Ergebnisse

6.1.1 Grundlegendes

Die Bestimmung der mittleren Differenzen und der zugehörigen Standardabweichungen der an den unterschiedlichen Immissionsmesspunkten messtechnisch erhobenen und korrigierten sowie der auf Grundlage der DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel erfolgt unter Berücksichtigung der folgenden Datensortierungen:

Auswertung der Datensätze in Abstandsklassen sowie im Mit- und Gegenwindbereich

Abstandsklasse 1:	370 m < d ≤ 550 m	Bezeichnung:	DW500/UW500
Abstandsklasse 2:	650 m < d ≤ 850 m	Bezeichnung:	DW500/UW750
Abstandsklasse 3:	880 m < d ≤ 1.150 m	Bezeichnung:	DW500/UW1000

Die erhobenen Daten im Bereich der Winkelmesspunkte werden in ihrer originären Zusammenstellung beurteilt. Zur Auswertung werden die arithmetischen Mittelwerte der Datensätze der 1. bis 10. Messnacht herangezogen. Die Auswertungen beinhalten folgende Angaben:

Tabelle 19 Übersicht Auswertung

Messbereich	d _m m	s m	Anz.	L _{Mess} dB(A)	s _x dB	L _{altBer} dB(A)	s _x dB	ΔL=L _{Mess} -L _{altBer} dB	s _x dB	ΔL-s _x dB	ΔL+s _x dB	P -
-------------	---------------------	--------	------	----------------------------	----------------------	------------------------------	----------------------	---	----------------------	-------------------------	-------------------------	--------

Hierbei ist:

Messbereich	der zur Auswertung herangezogene Teilbereich der Messungen
d _m in m	der mittlere Abstand zwischen den Emissionsquellen (WEA) und den Immissionsmesspunkten
s in m	die zugehörige Standardabweichung der Abstände
Anz.	die Anzahl an herangezogenen Datensätzen
L _{Mess} in dB(A)	der arithm. Mittelwert der messtechnisch erhobenen und korrigierten Immissionspegel
L _{altBer} in dB(A)	der arithm. Mittelwert der nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel
L _{freqBer} in dB(A)	der arithm. Mittelwert der nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 berechneten Immissionspegel (nicht dargestellt)
ΔL in dB	die Differenz der Mittelwerte der messtechnisch erhobenen und berechneten Immissionspegeln
s _x in dB	der jeweils zugehörige Standardfehler $s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$
ΔL ± s _x in dB	Differenz abzgl./zzgl. Standardfehler
p	p-Wert als Kriterium der statistischen Signifikanz

6.1.2 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.2)

Die Auswertung der Mess- und Berechnungsergebnisse führt unter Berücksichtigung sämtlicher Datensätze der 10 Messnächte sowie der Sortierung in Abstandsklassen unter Berücksichtigung des alternativen Berechnungsverfahrens zu folgenden Ergebnissen hinsichtlich der mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 20 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.2)											Messung 1 - 10		
Sortierung nach Abstandsklassen											α=0.10		
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	L_{Mess} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	L_{altBer} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{Mess} - L_{altBer}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.1	0.7	1.0	0.4	0.6	1.4	0.34	
DW750	748	47	11	37.7	0.8	34.5	0.8	3.2	0.5	2.7	3.7	0.01	
DW1000	1003	81	8	35.5	1.1	31.4	1.0	4.1	0.5	3.6	4.6	0.01	
DW75015G	733	25	5	39.2	1.0	36.0	0.4	3.2	0.6	2.6	3.8	0.03	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	35.4	0.5	1.4	0.7	0.7	2.0	0.30	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	34.6	0.3	0.2	0.6	-0.4	0.8	0.69	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	39.7	1.8	0.1	0.6	-0.5	0.7	0.97	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	34.0	1.3	1.6	0.5	1.1	2.1	0.44	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	30.2	1.1	2.1	0.7	1.4	2.8	0.26	

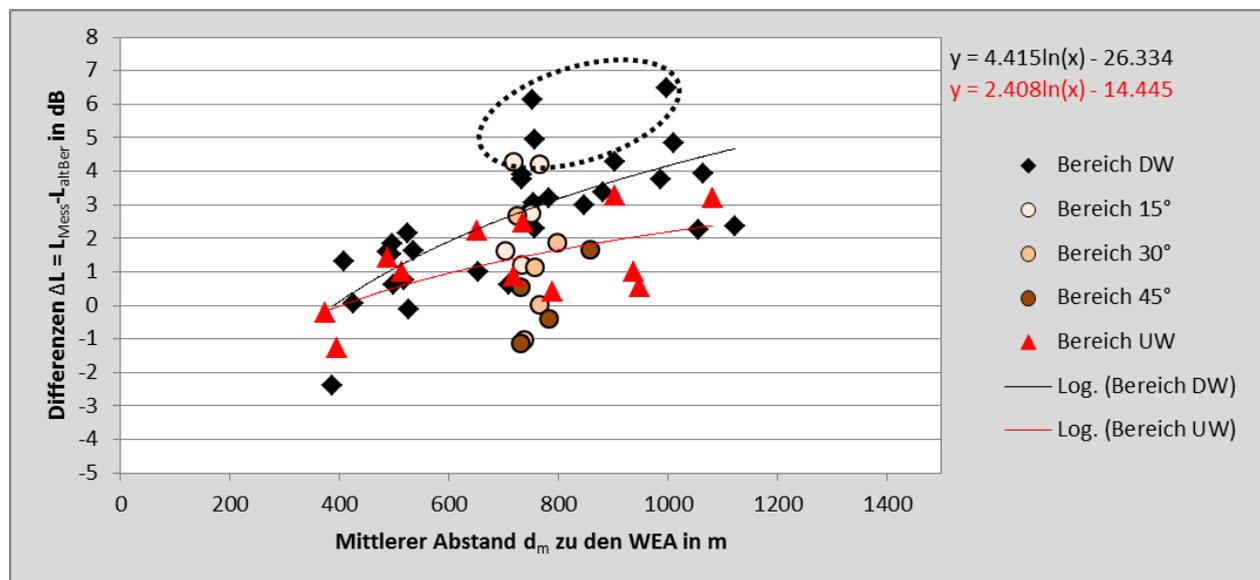


Abbildung 4 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2 berechneten Schalldruckpegel

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die nachfolgend verworfenen Datensätze.

Das Verwerfen von Datensätzen (Ausreißer hinsichtlich der Differenz zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen, wobei in jedem Fall die Messergebnisse nach oben abweichen¹⁰) führt zu folgenden mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 21 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2, Datensätze verworfen

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.2)											Messung 1 - 10		
Sortierung nach Abstandsklassen, Datensätze verworfen											α=0.10		
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	L_{Mess} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	L_{altBer} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{Mess} - L_{altBer}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.1	0.7	1.0	0.4	0.6	1.4	0.34	
DW750	746	53	9	37.4	0.9	34.7	0.9	2.7	0.4	2.3	3.1	0.05	
DW1000	1004	87	7	34.9	1.1	31.4	1.1	3.6	0.4	3.2	3.9	0.04	
DW75015G	728	24	3	37.4	0.8	35.5	0.3	2.0	0.5	1.5	2.4	0.11	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	35.4	0.5	1.4	0.7	0.7	2.0	0.30	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	34.6	0.3	0.2	0.6	-0.4	0.8	0.69	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	39.7	1.8	0.1	0.6	-0.5	0.7	0.97	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	34.0	1.3	1.6	0.5	1.1	2.1	0.44	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	30.2	1.1	2.1	0.7	1.4	2.8	0.26	

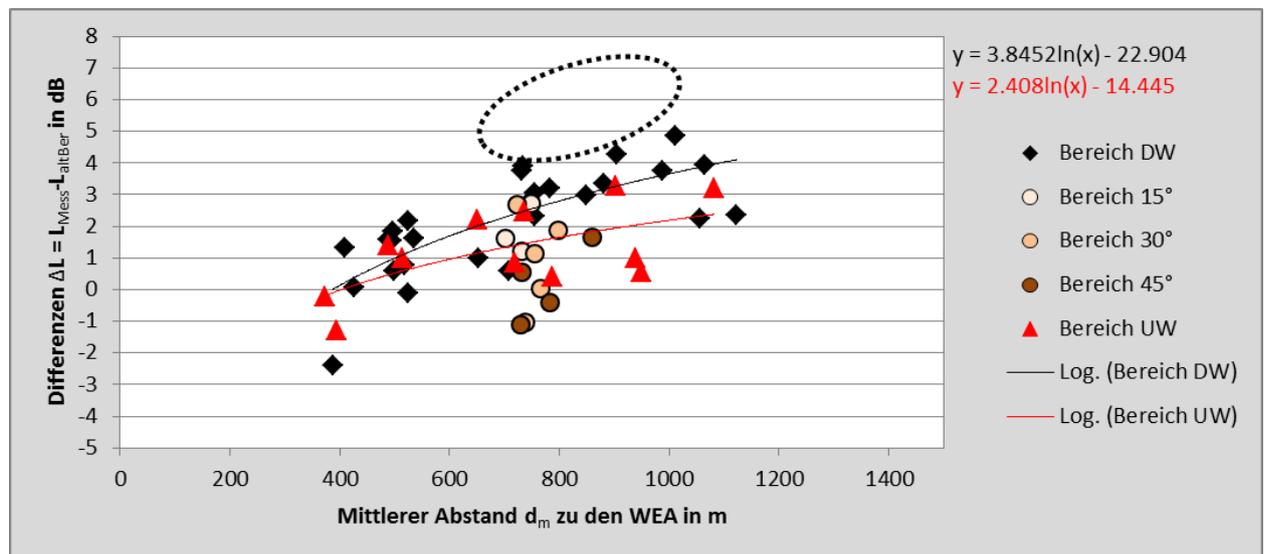


Abbildung 5 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die hier verworfenen Datensätze.

¹⁰ Nähere Informationen hierzu können der digitalen Dokumentation im Anhang E.1 entnommen werden

6.1.3 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=1)

Die Auswertung der Mess- und Berechnungsergebnisse führt unter Berücksichtigung sämtlicher Datensätze der 10 Messnächte sowie der Sortierung in Abstandsklassen unter Berücksichtigung des allgemeinen Berechnungsverfahrens mit $G=1$ zu folgenden Ergebnissen hinsichtlich der mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 22 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, G=1

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=1)											Messung 1 - 10		
Sortierung nach Abstandsklassen											α=0.10		
Messpunkt	d _m m	s m	Anz.	L _{Mess} dB(A)	s _{x̄} dB	L _{freqBer} dB(A)	s _{x̄} dB	ΔL=L _{Mess} -L _{freqBer} dB	s _{x̄} dB	ΔL - s _{x̄} dB	ΔL + s _{x̄} dB	p	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	36.9	0.6	4.2	0.4	3.8	4.5	0.00	
DW750	748	47	11	37.7	0.8	32.8	0.7	4.9	0.5	4.5	5.4	0.00	
DW1000	1003	81	8	35.5	1.1	31.2	1.1	4.3	0.8	3.5	5.1	0.01	
DW75015G	733	25	5	39.2	1.0	34.2	0.4	5.0	0.6	4.4	5.6	0.01	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	33.8	0.5	3.0	0.7	2.3	3.6	0.05	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	33.1	0.3	1.8	0.6	1.2	2.3	0.03	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	36.4	1.5	3.4	0.4	3.0	3.8	0.19	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	32.2	1.1	3.4	0.7	2.8	4.1	0.13	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	29.1	1.0	3.1	0.8	2.4	3.9	0.10	

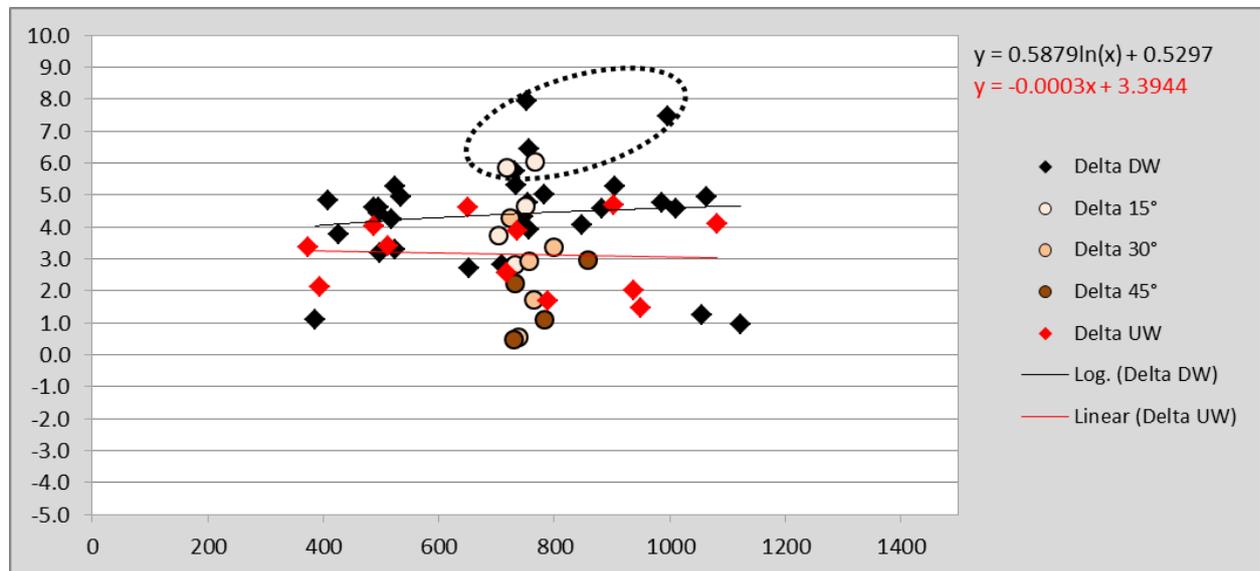


Abbildung 6 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=1 berechneten Schalldruckpegel

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die nachfolgend verworfenen Datensätze.

Das Verwerfen von Datensätzen (Ausreißer hinsichtlich der Differenz zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen, wobei in jedem Fall die Messergebnisse nach oben abweichen¹¹⁾) führt zu folgenden mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 23 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, G=1, Datensätze verworfen

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=1)											Messung 1 - 10	
Sortierung nach Abstandsklassen, Datensätze verworfen											α=0.10	
Messpunkt	d _m m	s m	Anz.	L _{Mess} dB(A)	S _{x̄} dB	L _{freqBer} dB(A)	S _{x̄} dB	ΔL=L _{Mess} -L _{freqBer} dB	S _{x̄} dB	ΔL - S _{x̄} dB	ΔL + S _{x̄} dB	p
DW500	482	51	11	41.0	0.7	36.9	0.6	4.2	0.4	3.8	4.5	0.00
DW750	746	53	9	37.4	0.9	32.9	0.8	4.4	0.4	4.1	4.8	0.00
DW1000	1004	87	7	34.9	1.1	31.3	1.2	3.7	0.7	3.0	4.3	0.05
DW75015G	728	24	3	37.4	0.8	33.6	0.3	3.8	0.5	3.3	4.4	0.02
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	33.8	0.5	3.0	0.7	2.3	3.6	0.05
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	33.1	0.3	1.8	0.6	1.2	2.3	0.03
UW500	442	69	4	39.8	1.7	36.4	1.5	3.4	0.4	3.0	3.8	0.19
UW750	723	57	4	35.6	1.5	32.2	1.1	3.4	0.7	2.8	4.1	0.13
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	29.1	1.0	3.1	0.8	2.4	3.9	0.10

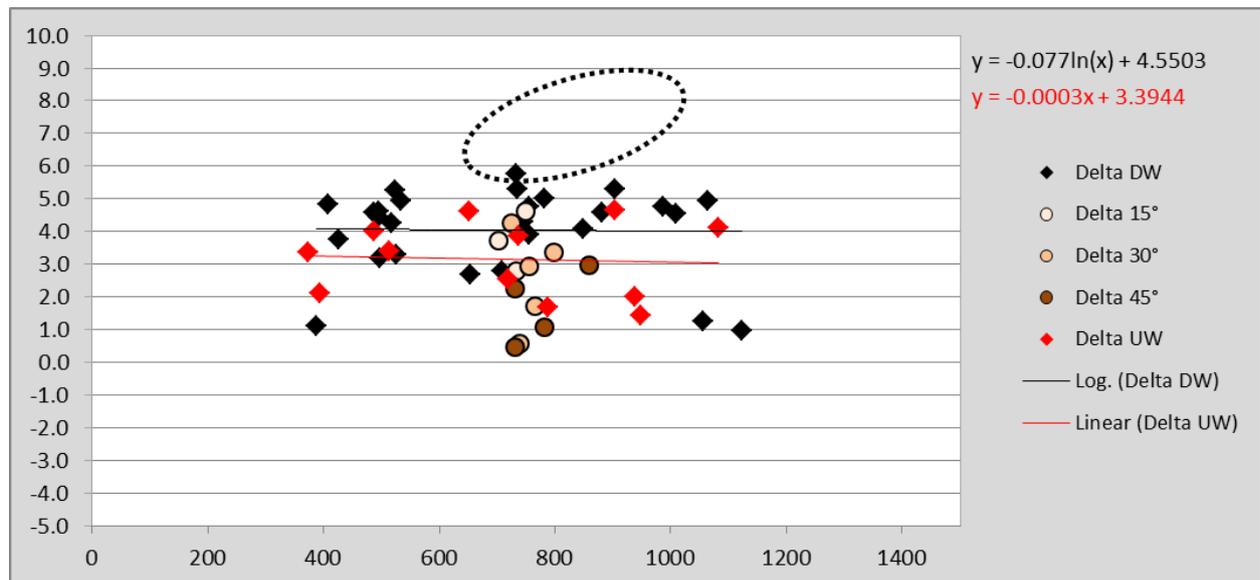


Abbildung 7 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=1 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die hier verworfenen Datensätze.

¹¹ Nähere Informationen hierzu können der digitalen Dokumentation im Anhang E.1 entnommen werden

6.1.4 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=0)

Die Auswertung der Mess- und Berechnungsergebnisse führt unter Berücksichtigung sämtlicher Datensätze der 10 Messnächte sowie der Sortierung in Abstandsklassen unter Berücksichtigung des allgemeinen Berechnungsverfahrens mit $G=0$ zu folgenden Ergebnissen hinsichtlich der mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 24 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, G=0

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=0)										Messung 1 - 10			
Sortierung nach Abstandsklassen										$\alpha=0.10$			
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	$L_{M\text{ess}}$ dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	L_{freqBer} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{M\text{ess}} - L_{\text{freqBer}}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.8	0.6	0.3	0.3	-0.1	0.6	0.77	
DW750	748	47	11	37.7	0.8	36.8	0.7	0.9	0.5	0.5	1.4	0.39	
DW1000	1003	81	8	35.5	1.1	34.4	0.9	1.1	0.5	0.6	1.6	0.47	
DW75015G	733	25	5	39.2	1.0	38.2	0.4	1.0	0.6	0.4	1.6	0.39	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	37.8	0.5	-1.0	0.6	-1.6	-0.4	0.43	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	37.1	0.3	-2.2	0.6	-2.8	-1.7	0.01	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	40.3	1.6	-0.5	0.4	-0.9	-0.2	0.83	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	36.1	1.1	-0.5	0.7	-1.2	0.2	0.79	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	33.1	1.0	-0.8	0.8	-1.6	0.0	0.64	

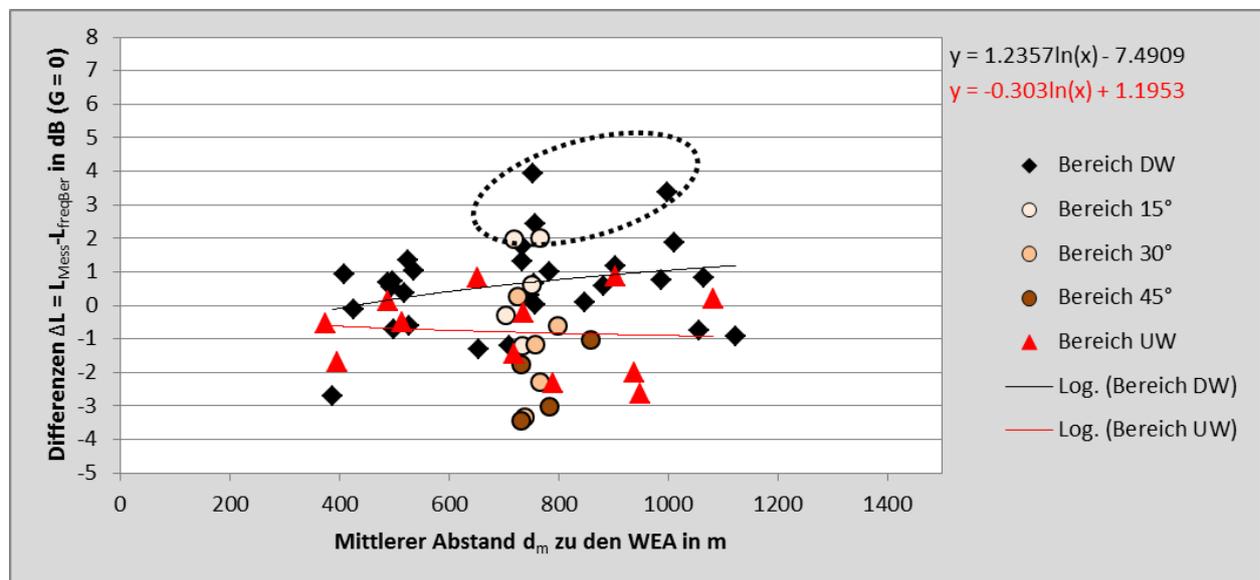


Abbildung 8 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die nachfolgend verworfenen Datensätze.

Das Verwerfen von Datensätzen (Ausreißer hinsichtlich der Differenz zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen, wobei in jedem Fall die Messergebnisse nach oben abweichen¹²⁾ führt zu folgenden mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 25 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, G=0, Datensätze verworfen

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.1, G=0)												Messung 1 - 10	
Sortierung nach Abstandsklassen, Datensätze verworfen												α=0.10	
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	L_{Mess} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$L_{freqBer}$ dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{Mess} - L_{freqBer}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.8	0.6	0.3	0.3	-0.1	0.6	0.77	
DW750	746	53	9	37.4	0.9	36.9	0.8	0.4	0.3	0.1	0.8	0.71	
DW1000	1004	87	7	34.9	1.1	34.4	1.1	0.6	0.4	0.2	0.9	0.72	
DW75015G	728	24	3	37.4	0.8	37.6	0.3	-0.2	0.5	-0.7	0.4	0.87	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	37.8	0.5	-1.0	0.6	-1.6	-0.4	0.43	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	37.1	0.3	-2.2	0.6	-2.8	-1.7	0.01	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	40.3	1.6	-0.5	0.4	-0.9	-0.2	0.83	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	36.1	1.1	-0.5	0.7	-1.2	0.2	0.79	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	33.1	1.0	-0.8	0.8	-1.6	0.0	0.64	

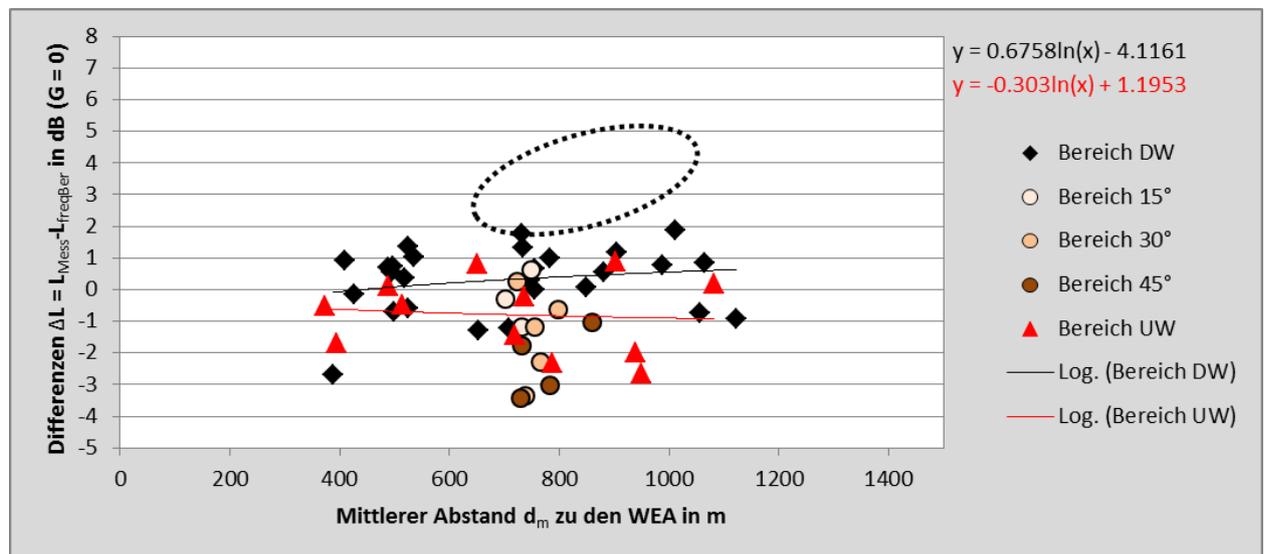


Abbildung 9 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei G=0 berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die hier verworfenen Datensätze.

¹²⁾ Nähere Informationen hierzu können der digitalen Dokumentation im Anhang E.1 entnommen werden

6.1.5 Auswertung in Abstandsklassen (Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, 7.3.2, $A_{gr}=0$)

Die Auswertung der Mess- und Berechnungsergebnisse führt unter Berücksichtigung sämtlicher Datensätze der 10 Messnächte sowie der Sortierung in Abstandsklassen unter Berücksichtigung des alternativen Berechnungsverfahrens mit $A_{gr}=0$ ¹³ zu folgenden Ergebnissen hinsichtlich der mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 26 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.2, $A_{gr}=0$

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.2, $A_{gr}=0$)													Messung 1 - 10	
Sortierung nach Abstandsklassen													$\alpha=0.10$	
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	$L_{M\text{ess}}$ dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$L_{\text{alt Ber}}$ dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{M\text{ess}} - L_{\text{alt Ber}}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -		
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.8	0.6	0.2	0.3	-0.1	0.6	0.82		
DW750	748	47	11	37.7	0.8	36.8	0.7	1.0	0.5	0.5	1.4	0.38		
DW1000	1003	81	8	35.5	1.1	34.4	1.0	1.2	0.5	0.7	1.7	0.44		
DW75015G	733	25	5	39.2	1.0	38.2	0.4	1.0	0.6	0.4	1.6	0.41		
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	37.8	0.5	-1.0	0.6	-1.7	-0.4	0.42		
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	37.1	0.3	-2.2	0.5	-2.8	-1.7	0.01		
UW500	442	69	4	39.8	1.7	40.4	1.6	-0.6	0.4	-1.0	-0.2	0.81		
UW750	723	57	4	35.6	1.5	36.1	1.1	-0.5	0.7	-1.1	0.2	0.81		
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	33.0	1.0	-0.8	0.8	-1.5	0.0	0.65		

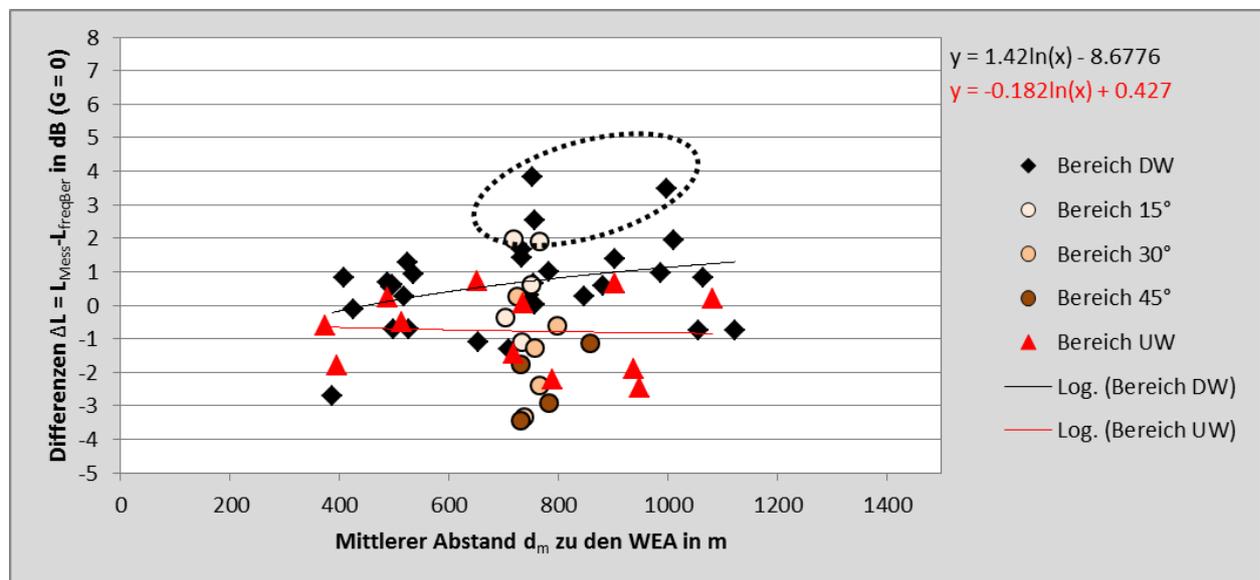


Abbildung 10 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei $G=0$ berechneten Schalldruckpegel

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die nachfolgend verworfenen Datensätze.

¹³ Da vermutet wird, dass der Term A_{gr} bei hochliegenden Quellen den Bodeneinfluss nicht sachgerecht abbildet, wird dieser zu Vergleichszwecken hier gleich Null gesetzt. Der Term D_{Ω} wird nach Gl. 11 DIN ISO 9613-2 weiterhin berücksichtigt.

Das Verwerfen von Datensätzen (Ausreißer hinsichtlich der Differenz zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen, wobei in jedem Fall die Messergebnisse nach oben abweichen¹⁴) führt zu folgenden mittleren Differenzen ΔL in dB und Standardfehlern $s_{\bar{x}}$:

Tabelle 27 Auswertung in Abstandsklassen, Ausbreitung gem. DIN ISO 9613-2, Pkt. 7.3.1, $A_{gr}=0$, Datensätze verworfen

Auswertung: Verfahren mit Dämpfungskonstante D (Ausbreitung DIN ISO 9613-2, 7.3.2, $A_{gr}=0$)													Messung 1 - 10
Sortierung nach Abstandsklassen, Datensätze verworfen													$\alpha=0.10$
Messbereich	d_m m	s m	Anz.	L_{Mess} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	L_{altBer} dB(A)	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L = L_{Mess} - L_{altBer}$ dB	$s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L - s_{\bar{x}}$ dB	$\Delta L + s_{\bar{x}}$ dB	p -	
DW500	482	51	11	41.0	0.7	40.8	0.6	0.2	0.3	-0.1	0.6	0.82	
DW750	746	53	9	37.4	0.9	36.9	0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.71	
DW1000	1004	87	7	34.9	1.1	34.3	1.1	0.6	0.4	0.3	1.0	0.68	
DW75015G	728	24	3	37.4	0.8	37.6	0.3	-0.2	0.5	-0.7	0.3	0.87	
DW75030G	756	28	5	36.8	1.1	37.8	0.5	-1.0	0.6	-1.7	-0.4	0.42	
DW75045G	776	61	4	34.9	0.5	37.1	0.3	-2.2	0.5	-2.8	-1.7	0.01	
UW500	442	69	4	39.8	1.7	40.4	1.6	-0.6	0.4	-1.0	-0.2	0.81	
UW750	723	57	4	35.6	1.5	36.1	1.1	-0.5	0.7	-1.1	0.2	0.81	
UW1000	968	78	4	32.3	1.2	33.0	1.0	-0.8	0.8	-1.5	0.0	0.65	

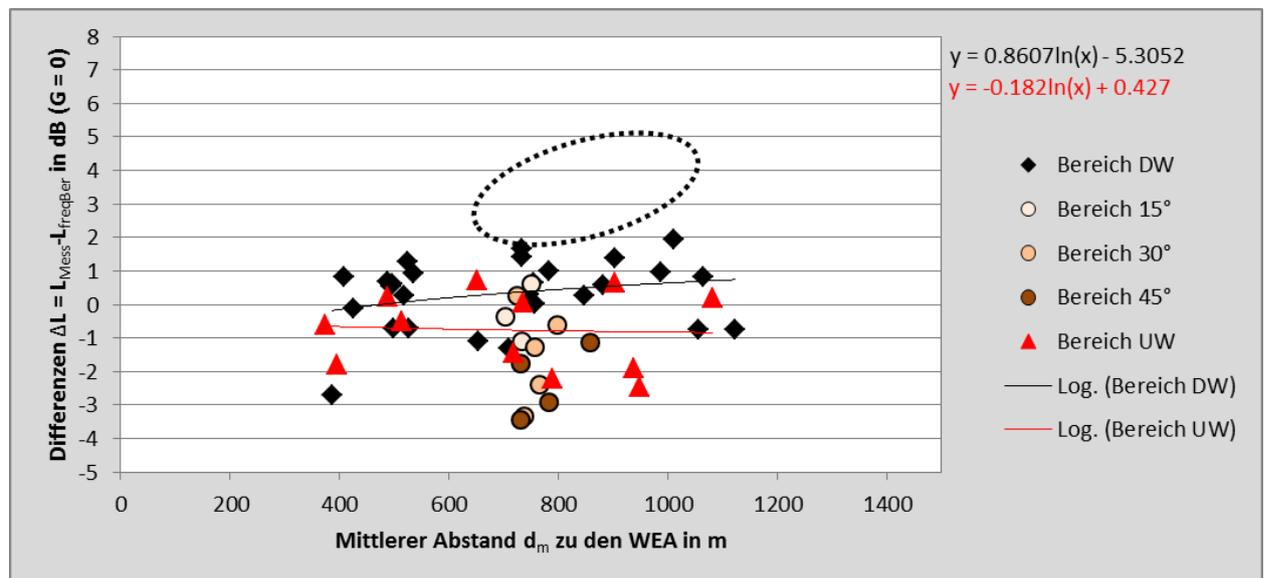


Abbildung 11 Differenzen der messtechnisch erhobenen Schalldruckpegel zu den gem. frequenzselektivem Verfahren der DIN ISO 9613-2 bei $G=0$ berechneten Schalldruckpegel, Datensätze verworfen

Hinweis: der mittels punktierter Linie gekennzeichnete Bereich umfasst die hier verworfenen Datensätze.

¹⁴ Nähere Informationen hierzu können der digitalen Dokumentation im Anhang E.1 entnommen werden

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen der erweiterten Hauptuntersuchung werden im Folgenden differenziert in Mitwind- und Gegenwindbereich (Tabelle 28) sowie winkelabhängig (Tabelle 29) hinsichtlich der Abstands- bzw. Winkelabhängigkeit dargestellt. Darüber hinaus erfolgt die Darstellung der Zu- bzw. Abnahme der Differenz bezogen auf eine Abstandsverdoppelung bzw. die Winkelvergrößerung zwischen Quelle und Empfänger. Sämtliche Daten werden dabei getrennt nach den unterschiedlichen Berechnungsverfahren der DIN ISO 9613-2, hier dem alternativen Verfahren, dem frequenzselektiven Verfahren mit $G = 0$ sowie dem alternativen Verfahren mit $A_{gr} = 0$ betrachtet.

Tabelle 28 Diskussion der Ergebnisse (Mitwind- und Gegenwindrichtung)

Diskussionspunkt		Vergleich der Messwerte mit Rechenwerten gemäß DIN ISO 9613-2					
		alternatives Verfahren		freq.-sel. Verfahren ($G=0$)		alt. Verfahren ($A_{gr}=0$)	
		alle Daten	Daten verworfen	alle Daten	Daten verworfen	alle Daten	Daten verworfen
DW	Abstandsabhängigkeit der Differenz ΔL	$10.2\log(d)$	$9.0\log(d)$	$3.0\log(d)$	$1.5\log(d)$	$3.3\log(d)$	$1.9\log(d)$
	Zunahme ΔL in dB	3.1 dB/2d	2.7 dB/2d	0.9 dB/2d	0.5 dB/2d	1.0 dB/2d	0.6 dB/2d
	$\Delta L_{p, Messung}$ in dB	5.5 dB/2d	6.1 dB/2d	5.5 dB/2d	6.1 dB/2d	5.5 dB/2d	6.1 dB/2d
	$\Delta L_{p, Berechnung}$ in dB	8.7 dB/2d		6.4 dB/2d		6.4 dB/2d	6.5 dB/2d
UW	Abstandsabhängigkeit der Differenz ΔL	$5.8\log(d)$		$-0.6\log(d)$		$-0.4\log(d)$	
	Zunahme ΔL in dB	1.7 dB/2d		-0.2 dB/2d		-0.1 dB/2d	
	$\Delta L_{p, Messung}$ in dB	7.5 dB/2d		7.5 dB/2d		7.5 dB/2d	
	$\Delta L_{p, Berechnung}$ in dB	9.5 dB/2d		7.2 dB/2d		7.4 dB/2d	

mit

d als Abstand innerhalb der untersuchten Grenzen in m

2d → Abstandsverdopplung

ΔL als Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Schalldruckpegeln in dB

$\Delta L_{p, Messung}$ als Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle gemessenen Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen in dB

$\Delta L_{p, Berechnung}$ als Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle berechneten Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen in dB

Tabelle 29 Diskussion der Ergebnisse (in 750 m Entfernung, winkelabhängig)

Diskussionspunkt		Vergleich der Messwerte mit Rechenwerten gemäß DIN ISO 9613-2						
		alternatives Verfahren		freq.-sel. Verfahren (G=0)		alt. Verfahren (A _{gr} =0)		
		alle Daten	Daten verworfen	alle Daten	Daten verworfen	alle Daten	Daten verworfen	
Winkel	Winkelabhängigkeit der Differenz ΔL	$-0.07(\alpha)+3.6$	$-0.05(\alpha)+2.8$	$-0.08(\alpha)+1.4$	$-0.06(\alpha)+0.5$	$-0.08(\alpha)+1.4$	$-0.06(\alpha)+0.6$	
	Abnahme ΔL in dB	1.1 dB/15°	0.8 dB/15°	1.1 dB/15°	0.9 dB/15°	1.1 dB/15°	0.9 dB/15°	
	L _{p,Messung} in dB	0° → 37.4 dB(A)		15° → 37.4 dB(A)		30° → 36.8 dB(A)		45° → 34.9 dB(A)
	L _{p,Berechnung} in dB Alternatives Verfahren	0° → 34.7 dB(A)		15° → 35.5 dB(A)		30° → 35.4 dB(A)		45° → 34.6 dB(A)
	L _{p,Berechnung} in dB G=0 oder A _{gr} =0	0° → 36.9 dB(A)		15° → 37.6 dB(A)		30° → 37.8 dB(A)		45° → 37.1 dB(A)

mit

- α als Winkel zwischen Messpunkt und Ausbreitungsrichtung in °
- ΔL als Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Schalldruckpegeln in dB
- $\Delta L_{p,Messung}$ als Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle gemessenen Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen in dB
- $\Delta L_{p,Berechnung}$ als Differenz zwischen den in unterschiedlichen Abständen zur Quelle berechneten Schalldruckpegeln innerhalb der untersuchten Grenzen in dB
- L_{p,Messung} als gemessener Schalldruckpegel innerhalb der untersuchten Grenzen in dB
- L_{p,Berechnung} als berechneter Schalldruckpegel innerhalb der untersuchten Grenzen in dB



7 Ausblick zur Verbesserung der Prognosequalität

Der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) empfiehlt in [10], Geräuschimmissionsprognosen für Windenergieanlagen nach dem alternativen Verfahren der DIN ISO 9613-2 durchzuführen, da es laut [15] entgegen dem frequenzselektiven Verfahren - dieses überschätzt die Bodendämpfung A_{gr} für hochliegende Quellen - höhere Immissionen für die Schallausbreitung hochliegender Quellen über Ackerboden und Wiesen prognostiziert.

Dieser Berechnungsansatz zzgl. ein in Summe mit mindestens $1,28 \cdot \sigma_{Prog} = 1,9$ dB anzusetzender Sicherheitszuschlag (Unsicherheit der Prognose) liefert aktuell einen nicht durch systematische Untersuchungen abgesicherten Prognoseansatz.

Die gegenständlichen Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass eine Abbildung der messtechnisch ermittelten Schallausbreitung von Geräuschen hoher Windenergieanlagen im Abstandsbereich zwischen ~350 m und ~1.200 m mittels des alternativen Berechnungsverfahrens der DIN ISO 9613-2 keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert.

So zeigen die Messwerte, dass sich die Schallpegelabnahme $\Delta L_{p, Messung}$ in dB im Mitwindbereich, wie unter Freifeldbedingungen üblich, auf ~6 dB je Abstandsverdopplung beläuft. Im Gegenwindbereich ist die messtechnisch ermittelte Schallpegelabnahme mit ~7 dB zu beziffern. Die Schallausbreitung der WEA-Geräusche folgt demnach, abweichend der Vermutungen aus den Ergebnissen der Hauptuntersuchung (Zylinderwelle, vgl. hierzu Kapitel 2.4.3), den Gesetzmäßigkeiten der Ausbreitung einer Kugelwelle ($1/R^2$).

Hierauf aufbauend ist zu erkennen, dass die ermittelten Differenzen ΔL in dB zwischen der messtechnisch nachgewiesenen Schallausbreitung und der Ausbreitungsberechnung gemäß dem alternativen Verfahren der DIN ISO 9613-2 in etwa der Beziehung $9 \log(\mathbf{d})$ im Mitwindbereich bzw. $6 \log(\mathbf{d})$ im Gegenwindbereich gehorchen. Die Differenzen nehmen somit je Abstandsverdoppelung um ~3 dB im Mitwindbereich bzw. ~2 dB im Gegenwindbereich zu.

Hinweise gibt hier der Vergleich der ΔL -Verläufe der messtechnisch erhobenen Daten, der Berechnungen gemäß frequenzselektivem Verfahren mit $G = 0$ sowie der Berechnungen nach dem alternativen Verfahren mit $A_{gr} = 0$ in Abhängigkeit der Berechnungen gemäß alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2, also den Empfehlungen des LAI. Der Vergleich wird getrennt für den Mit- und Gegenwindbereich durchgeführt.

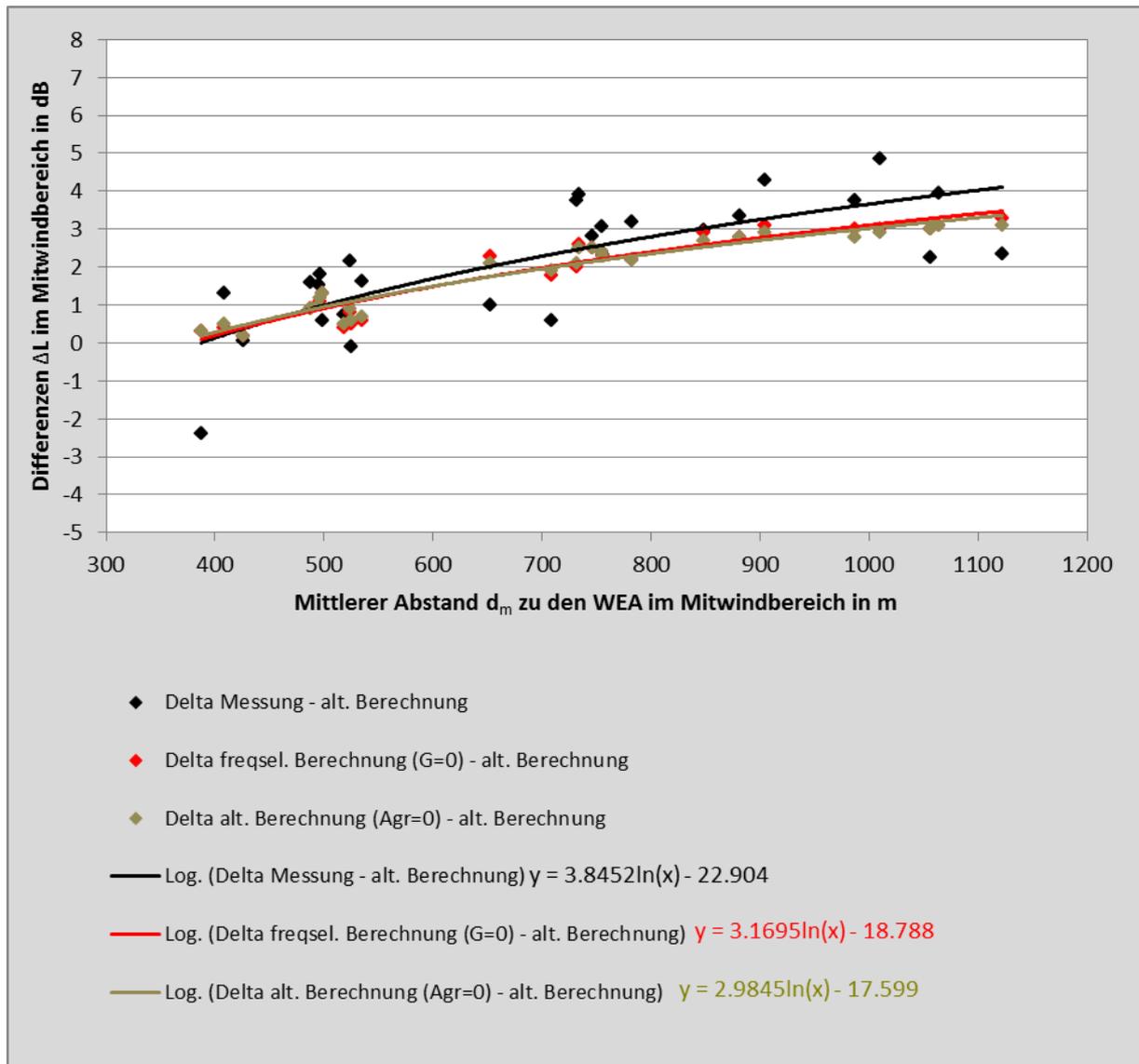


Abbildung 12 Differenzen der Schalldruckpegel (Mitwindbereich)

Wie im Mitwindbereich zu erkennen ist, korreliert die Differenz ΔL in dB zwischen den messtechnisch erhobenen Daten und dem alternativen Berechnungsverfahren sehr gut mit den Differenzen zwischen der frequenzselektiven Berechnung mit $G = 0$ bzw. der alternativen Berechnung mit $A_{gr} = 0$ und dem alternativen Verfahren.

Entsprechend der obigen Abbildung ist vielmehr zu erkennen, dass die Differenz zwischen dem allgemeinen Verfahren der DIN ISO 9613-2 unter Berücksichtigung von $G = 0$ (oder dem alternativen Berechnungsverfahren mit $A_{gr} = 0$) und dem alternativen Verfahren sich auf $\Delta L < 1$ dB im untersuchten Abstandsbereich beschränkt.



Diese Erkenntnis zeigt, dass der Ansatz, die Bodendämpfung bei der Berechnung der Schallausbreitung von hohen Windenergieanlagen entsprechend Gleichung (10) der DIN ISO 9613-2 mit $A_{gr} = 4.8 \cdot (2h_m/d)[17 + (300/d)]$ zu modellieren, die messtechnischen Erfahrungen im Mitwindbereich nicht abbildet. Die Extrapolation der maximalen Differenz bis 4.000 m zeigt, dass sich der Fehler über den Abstand mit $1.83 \log(d) - 4.82$ im untersuchten Abstandsbereich vergrößert.

Das nachstehende Diagramm verdeutlicht nochmals die gute Abbildung der Messwerte durch die frequenzselektive Berechnung mit $G = 0$.

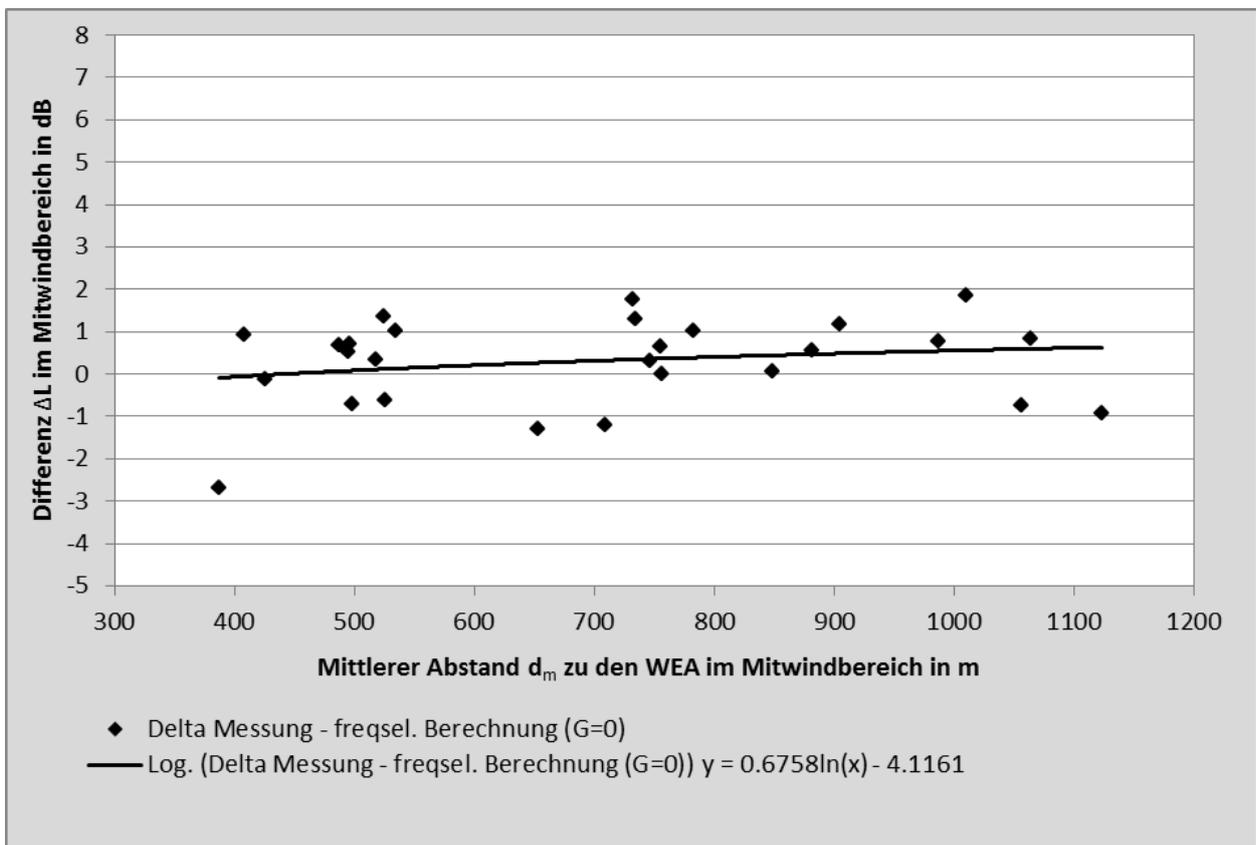


Abbildung 13 Einzelbetrachtung: Differenz der Messwerte/Frequenzselektive Berechnung mit $G=0$ im Mitwindbereich

Abweichend vom Mitwindbereich zeigen die Daten im Gegenwindbereich, dass die Differenz ΔL zwar sehr gut korrelieren, der Verzicht von A_{gr} bei der Berechnung nach dem alternativen Verfahren bzw. die Modellierung der Bodendämpfung nach dem frequenzselektiven Verfahren mit $G = 0$ dazu führen, dass die Schallausbreitung der Geräusche von hohen WEA im Gegenwindbereich überschätzt wird.



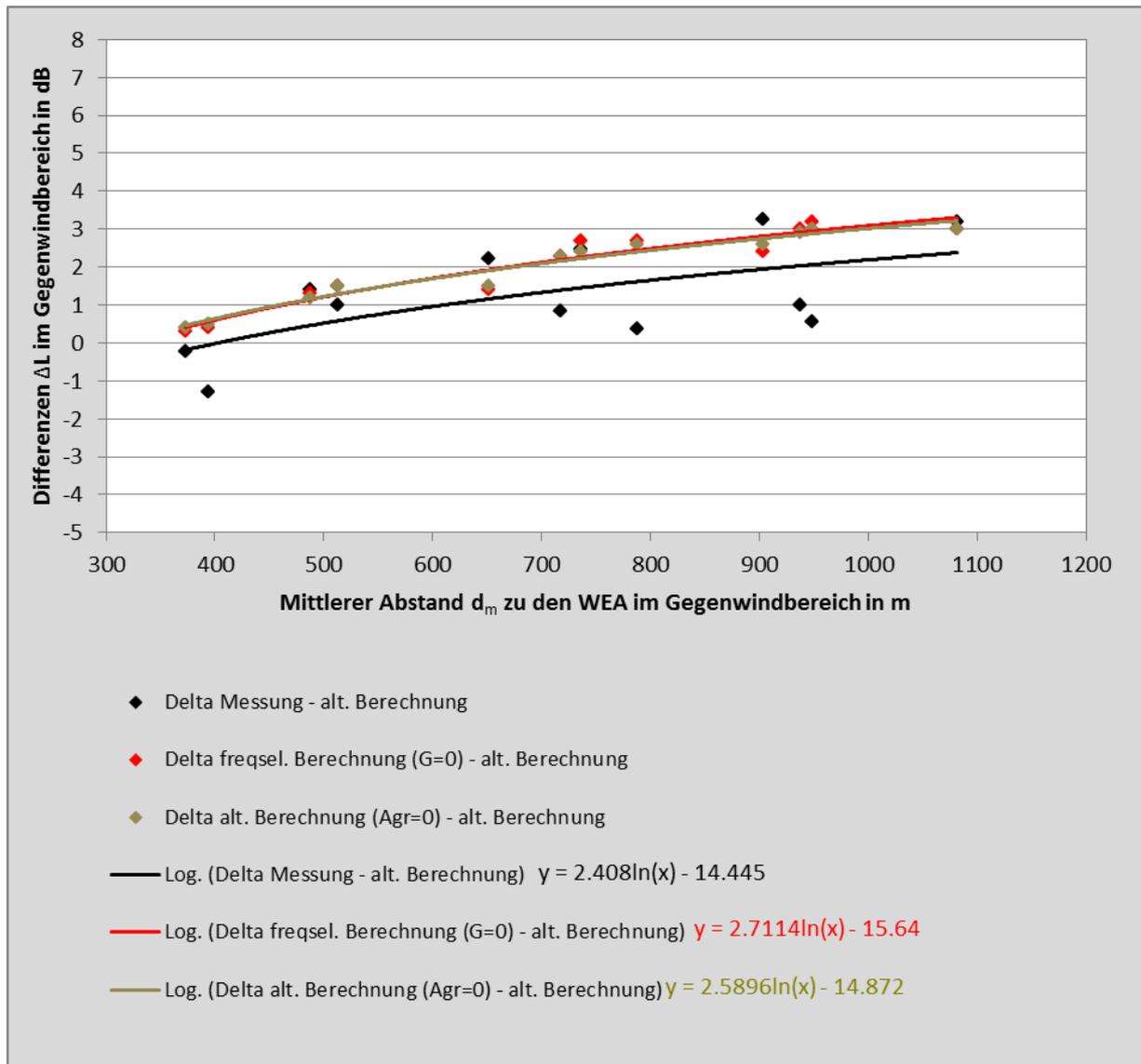


Abbildung 14 Differenzen der Schalldruckpegel (Gegenwindbereich)

Die Differenz zwischen dem allgemeinen Verfahren der DIN ISO 9613-2 unter Berücksichtigung von $G = 0$ (oder dem alternativen Berechnungsverfahren mit $A_{gr} = 0$) und dem alternativen Verfahren beschreibt ein nahezu konstantes $\Delta L = 1$ dB im untersuchten Abstandsbereich. Die Extrapolation der maximalen Differenz bis 4.000 m zeigt, dass sich der Fehler über den Abstand mit $-0.68\log(d)+1.13$ im untersuchten Abstandsbereich vergrößert.

Das nachstehende Diagramm verdeutlicht nochmals die gute Abbildung der Messwerte durch die frequenzselektiver Berechnung mit $G = 0$.

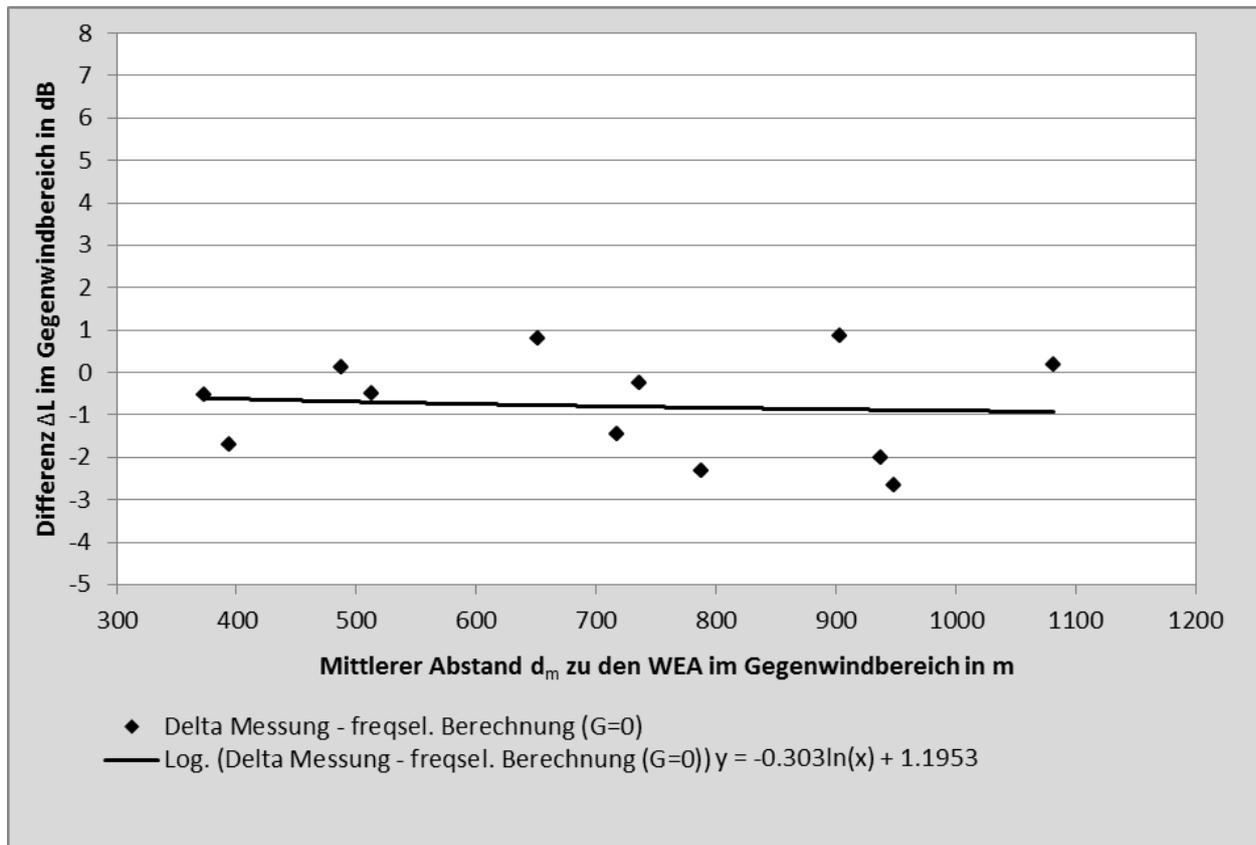


Abbildung 15 Einzelbetrachtung: Differenz der Messwerte/Frequenzselektive Berechnung mit G=0 im Gegenwindbereich

Hinsichtlich einer Richtwirkung im Immissionsbereich zeigt sich, dass die Schallpegelabnahme unter Winkelvergrößerung im Bereich zwischen 0° und 45° gegen die Ausbreitungsrichtung auf ~1 dB/15° beläuft. Diese Schallpegelabnahme über die Winkelvergrößerung gegen die Ausbreitungsrichtung ist nicht allein auf die in [21, 23, 31] beschriebene - basierend auf der Tatsache der hauptsächlich an den Rotorspitzen und Rotorblatthinterkanten aus aerodynamischen Gründen entstehenden Geräuschen - WEA-induzierte, also emissionsseitige Richtwirkung (vgl. hierzu

Abbildung 16), zu begründen, da diese im 45°-Bereich einen Wert von lediglich ca. 1 dB annimmt.

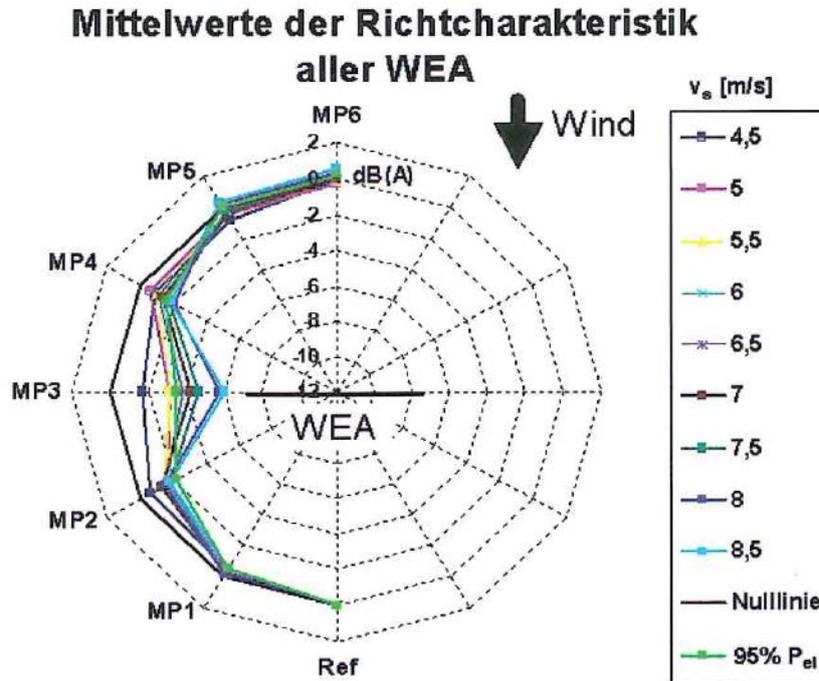


Abbildung 16: Richtcharakteristiken von hohen WEA in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit [31]

Abschließend bleibt also festzuhalten, dass die ermittelte Differenz zwischen den messtechnisch erhobenen Daten und den mittels – wie vom LAI empfohlen - alternativem Verfahren der DIN ISO 9613-2 durchgeführten Ausbreitungsberechnungen der Geräusche von hohen Windenergieanlagen im Wesentlichen durch die hierfür nicht einwandfreie Modellierung der Bodendämpfung A_{gr} verursacht sein kann.

Während die alternative Berechnungsvariante im Nahbereich von < 500 m der WEA sowohl im Luv und im Lee gut funktioniert, driften die Mess- und Rechenergebnisse darüber hinaus weit auseinander, da die Bodendämpfung A_{gr} durch das alternative Verfahren teils deutlich überschätzt wird. Dieser Effekt ist dabei im Mitwindbereich größer als im Gegenwindbereich.

Grundsätzlich ist zu vermuten, dass dies dadurch zu begründen ist, dass die Modellierung des A_{gr} empirisch stattgefunden hat, wobei die Messungen dabei im Umfeld von zwei Großindustrieanlagen stattfanden. Die max. Höhe der dort relevanten und somit in der Modellierung von A_{gr} berücksichtigten Quellen drückt sich dabei wohl bei der Schätzung der Genauigkeit in der DIN ISO 9613-2 aus, die entsprechende Angaben auf eine Quelhöhe von max. 30 m beschränkt.

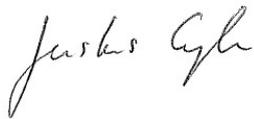
Der aktuell anzusetzende Sicherheitszuschlag von $\min. 1.28 \cdot \sigma_{\text{Prog}} = 1.9 \text{ dB}$ deckt die beschriebenen Abweichungen - verursacht durch A_{gr} - ausschließlich im Nahbereich ab. Ein zukünftiger Sicherheitszuschlag sollte konsequenterweise nun nicht pauschal vergeben werden, sondern könnte in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Emissionsquelle und Immissionsort sowie des angewandten Berechnungsmodells (z. B. dem alternativen Verfahren oder dem frequenzselektiven Verfahren unter Berücksichtigung des der Realität entsprechenden Bodenfaktors gemäß DIN ISO 9613-2) berechnet werden. Der Sicherheitszuschlag könnte durch das Heranziehen eines entsprechend noch zu ermittelnden Terms beschrieben werden.

Ggf. kann bei den Ausbreitungsberechnungen ein Abzug hinsichtlich der Winkelabhängigkeit gegenüber der Hauptausbreitungsrichtung von $1 \text{ dB}/15^\circ$ im Bereich bis 45° zur Ausbreitungsrichtung sowie von $-0.68 \log(d) + 1.13$ in Gegenwindrichtung [vgl. hierzu 31] angesetzt werden.

Die Unterzeichner erstellten dieses Gutachten unabhängig und nach bestem Wissen und Gewissen.

Als Grundlage für die Feststellungen und Aussagen der Sachverständigen dienten die vorgelegten und im Gutachten zitierten Unterlagen sowie die Auskünfte der Beteiligten.

Bericht verfasst durch:



B. Eng. Justus Engelen
Projektleiter

Geprüft und freigegeben durch:



Dipl.-Ing. Peter Wenzel
Fachlich Verantwortlicher

Anhang

Verzeichnis des Anhangs

- A** **Dokumentation der Emissionsmessungen**
- B** **Dokumentation der Immissionsmessungen**
- C** **Dokumentation der Schallausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2**
- D** **Grafische Dokumentation der SODAR-RASS-Messungen**
- E** **Digitale Dokumentation**
- F** **Lagepläne**

A Dokumentation der Emissionsmessungen

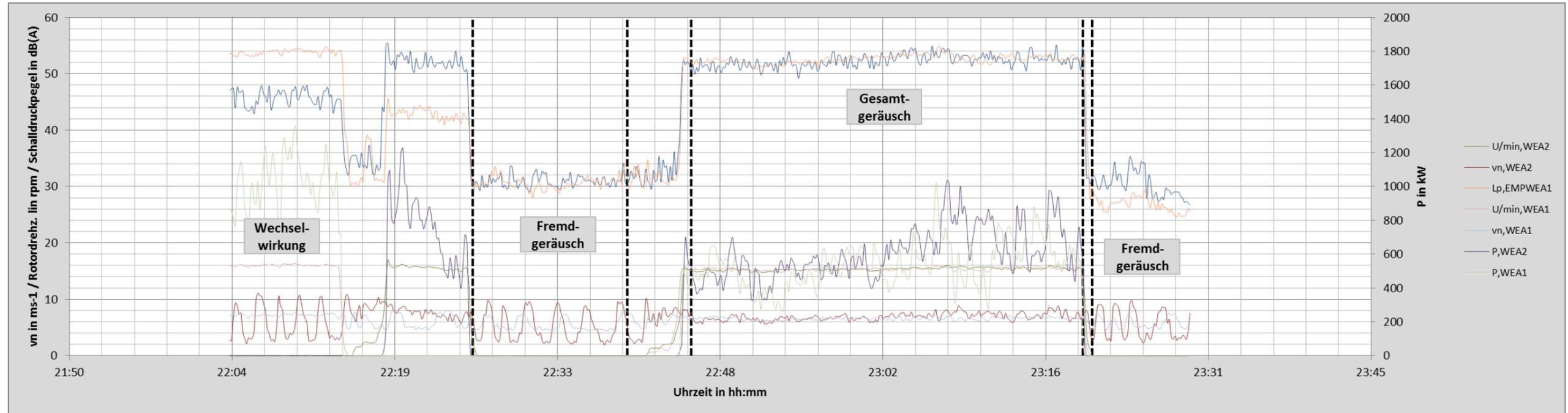
A.1 Schalldruckpegel, Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe, Leistungsdaten und Rotordrehzahl

A.2 Schalldruckpegel am Referenzmesspunkt als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

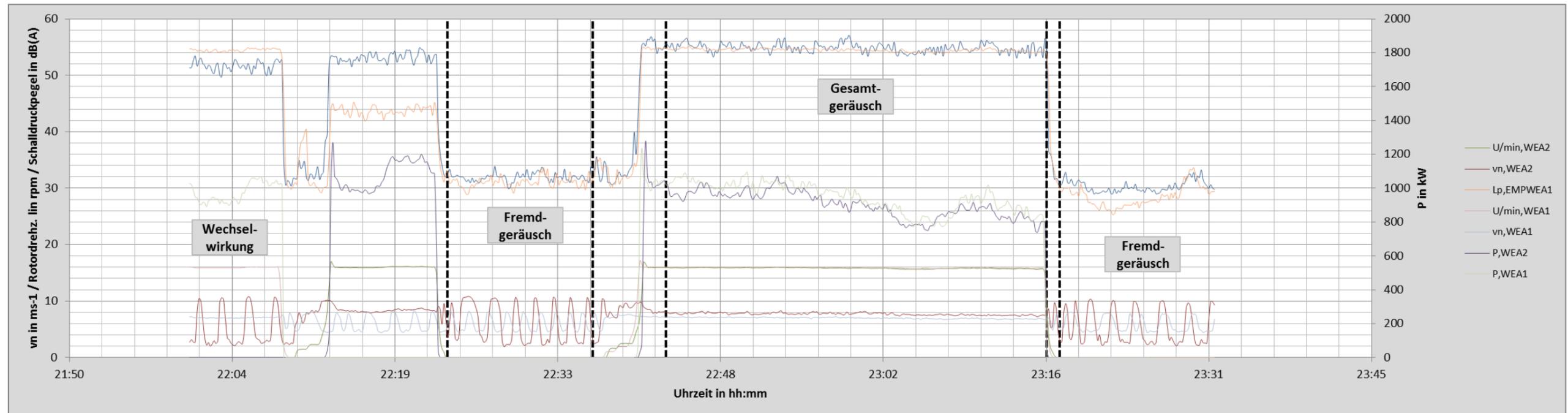


A.1 Schalldruckpegel, Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe, Leistungsdaten und Rotordrehzahl

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

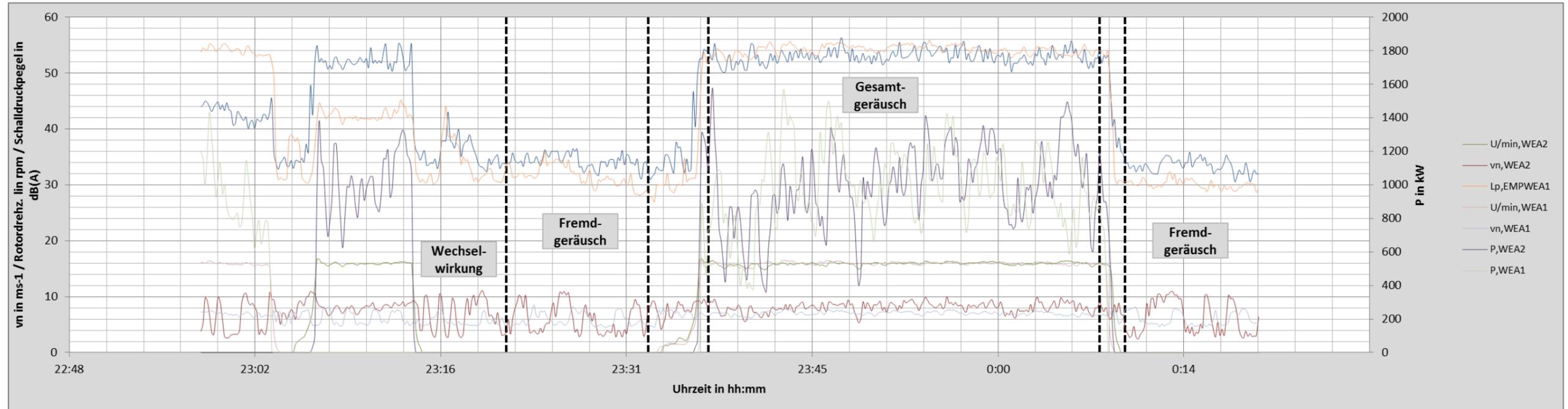


2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr

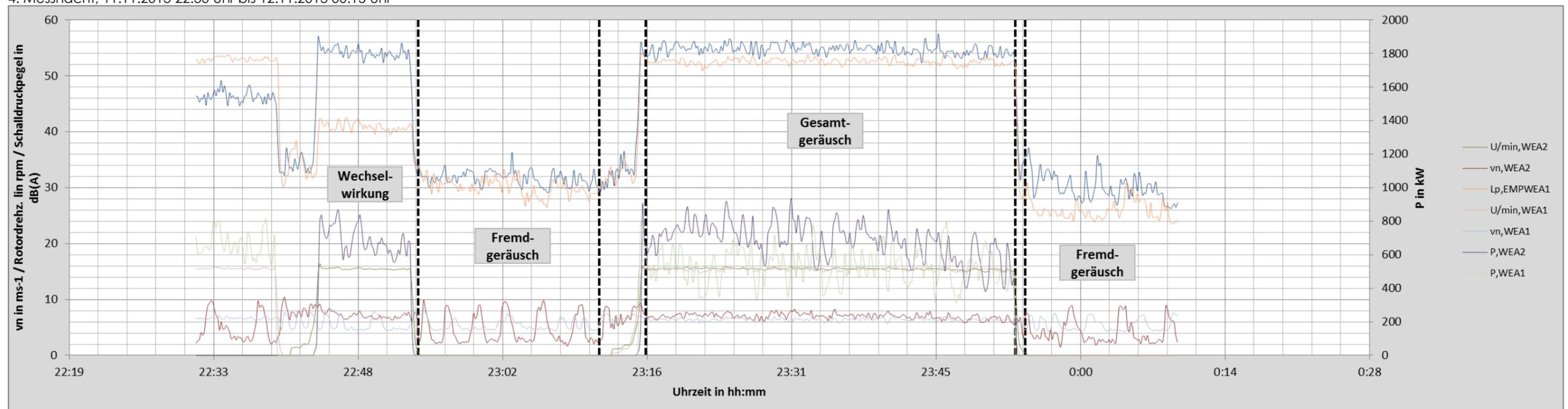


A.1 Schalldruckpegel, Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe, Leistungsdaten und Rotordrehzahl

3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr

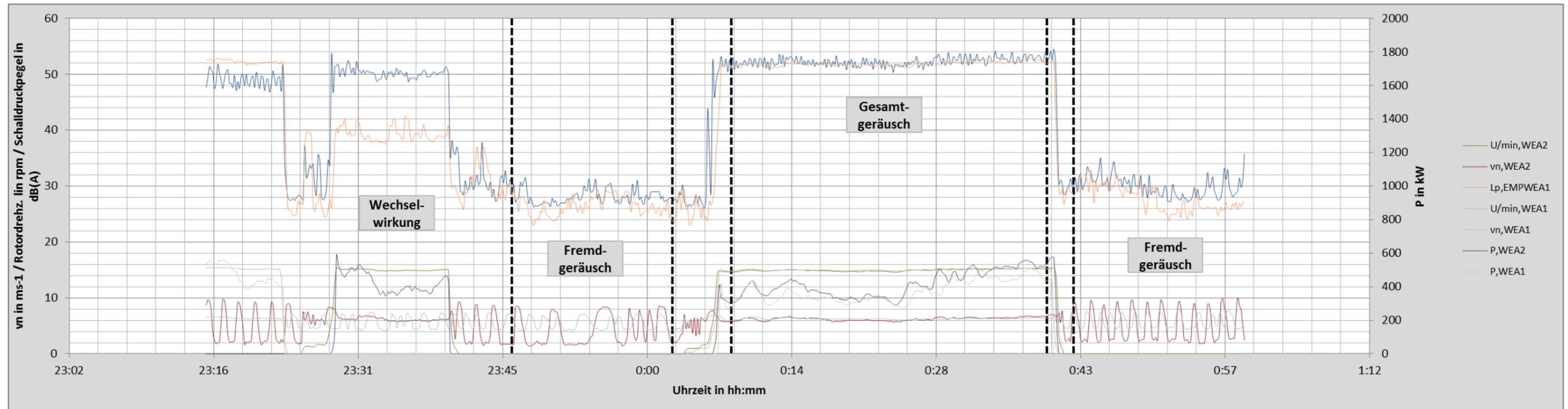


4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr



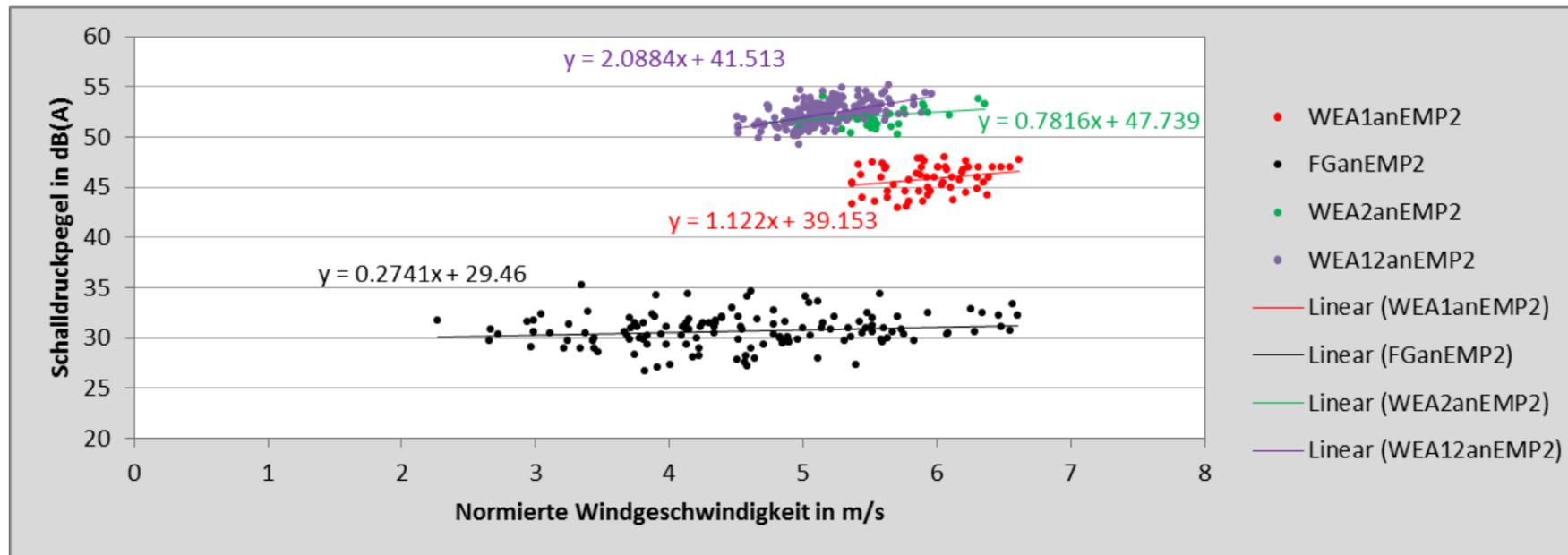
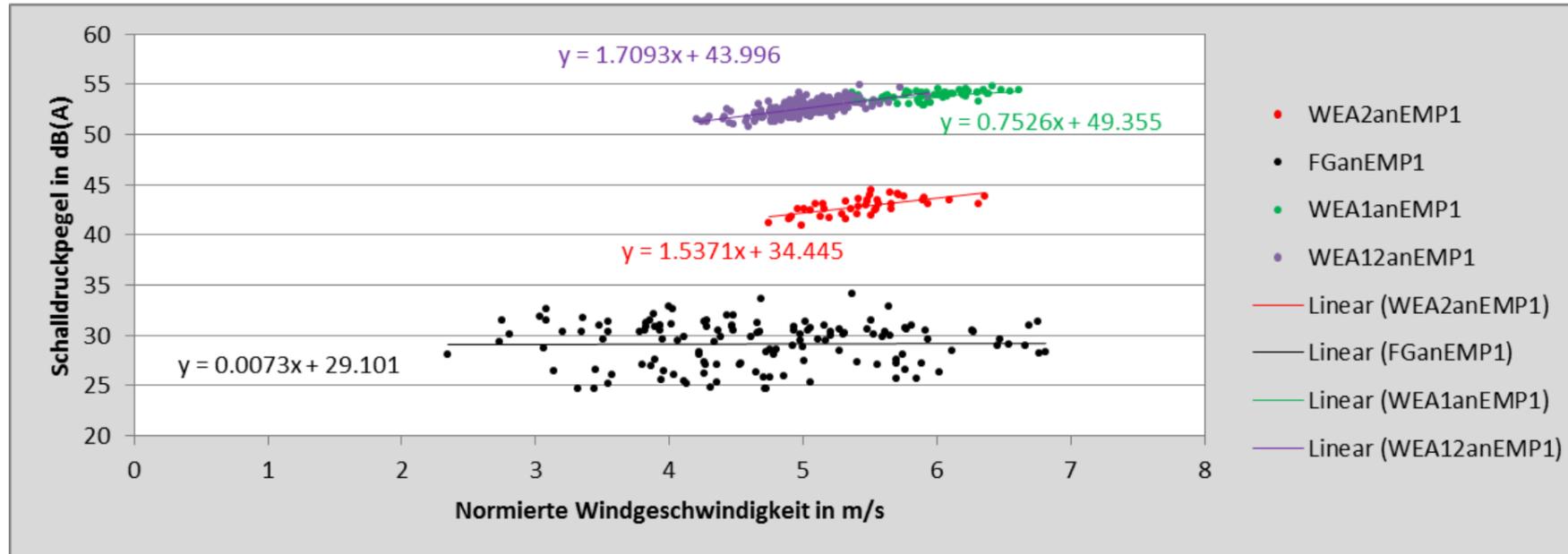
A.1 Schalldruckpegel, Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe, Leistungsdaten und Rotordrehzahl

5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr



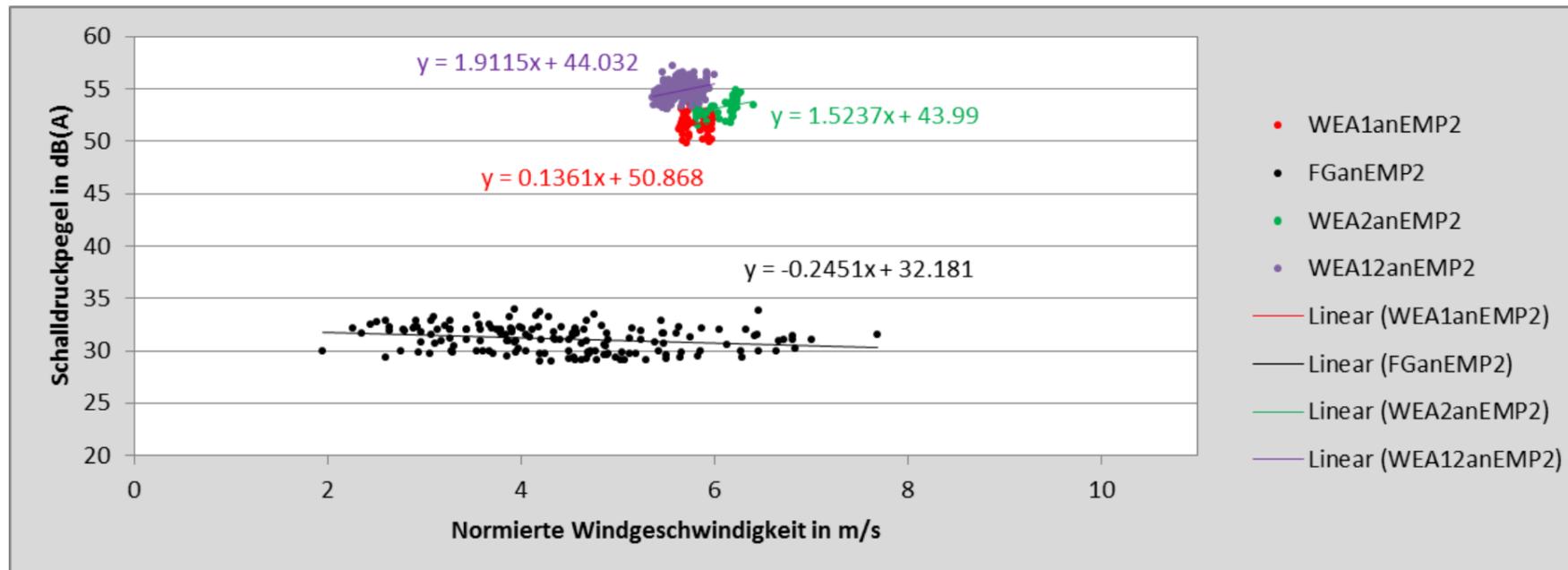
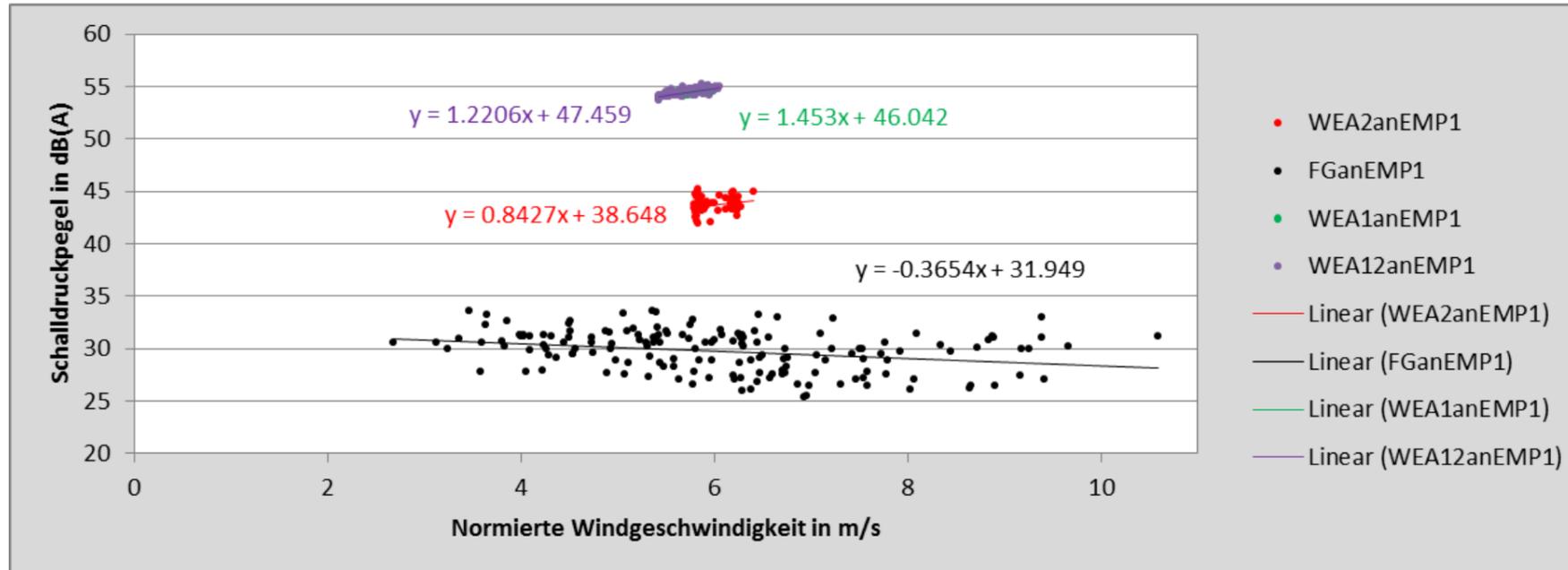
A.2 Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



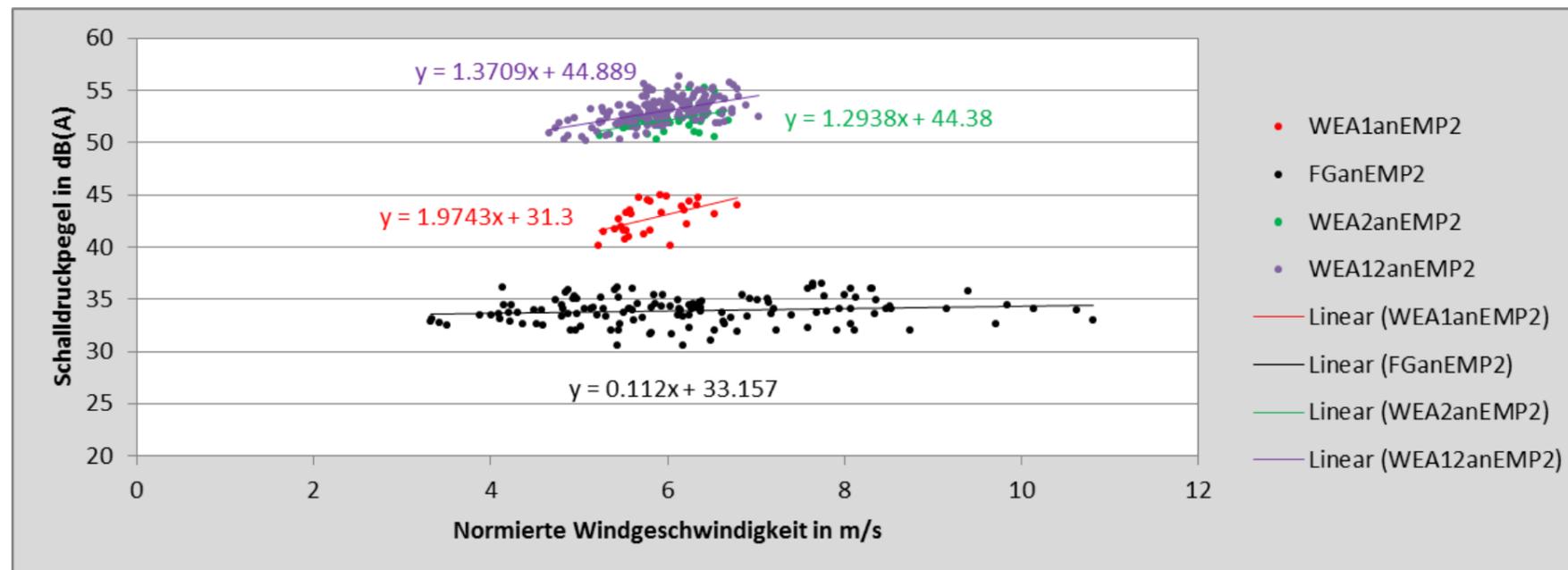
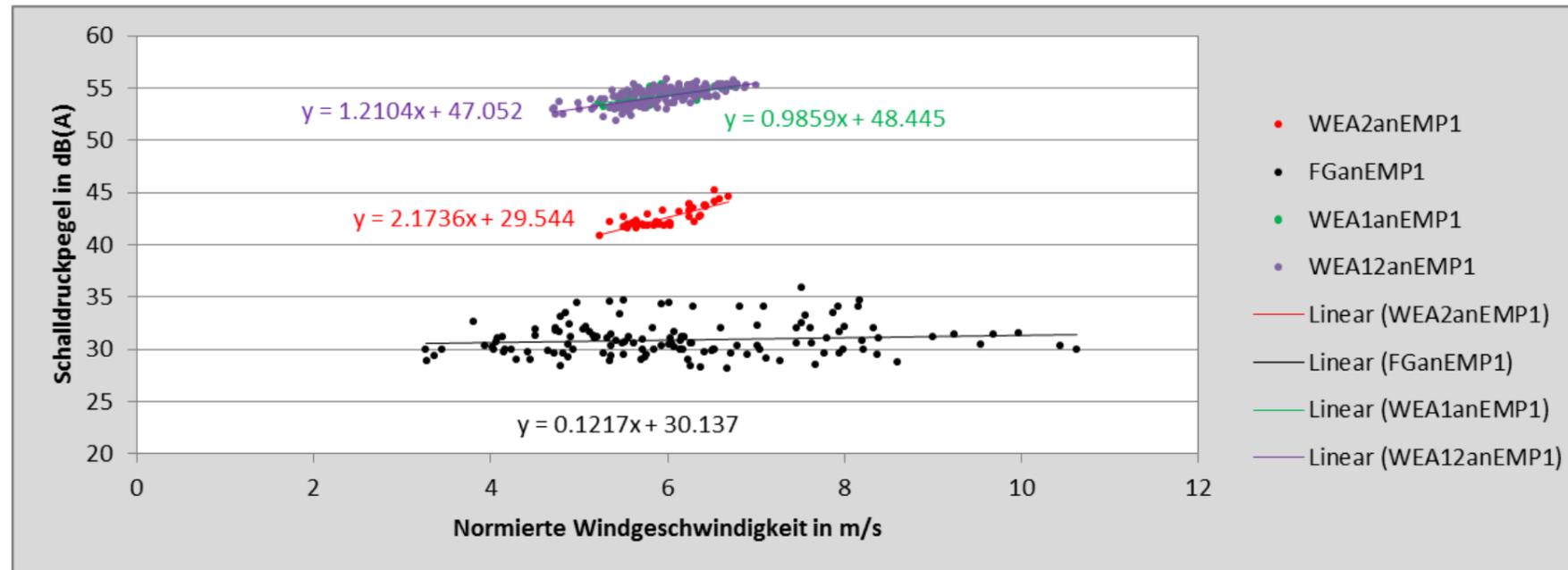
A.2 Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



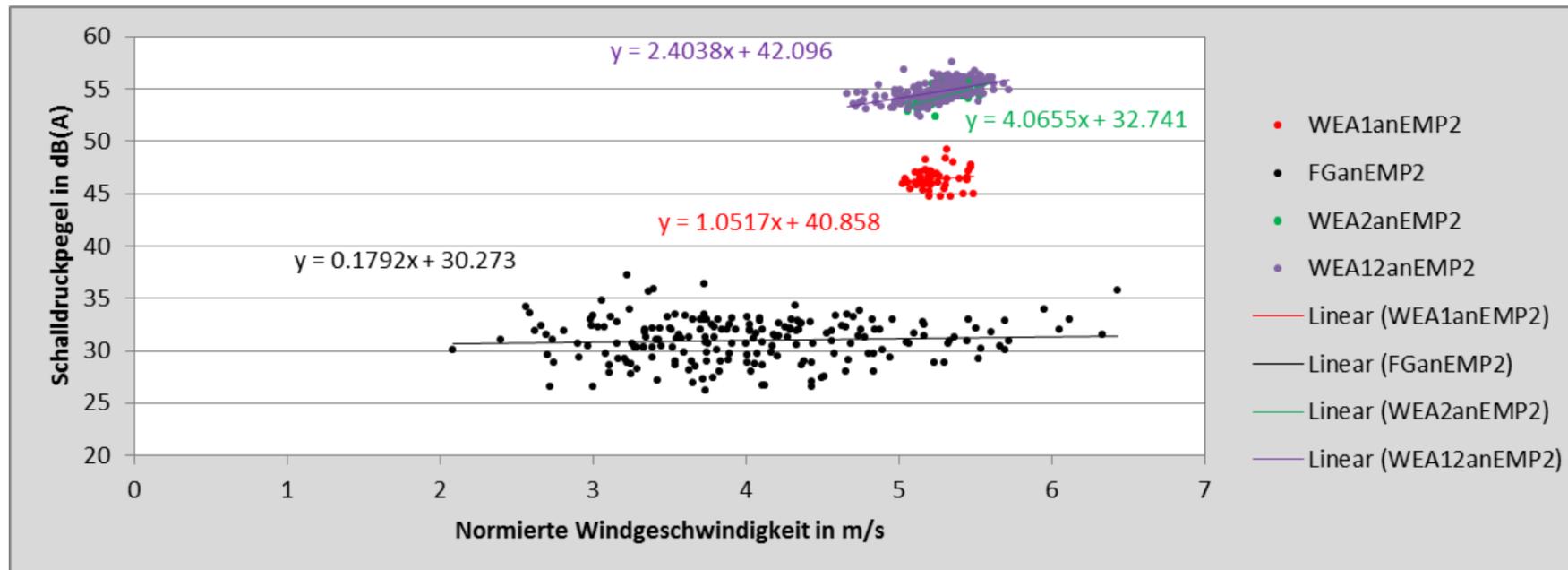
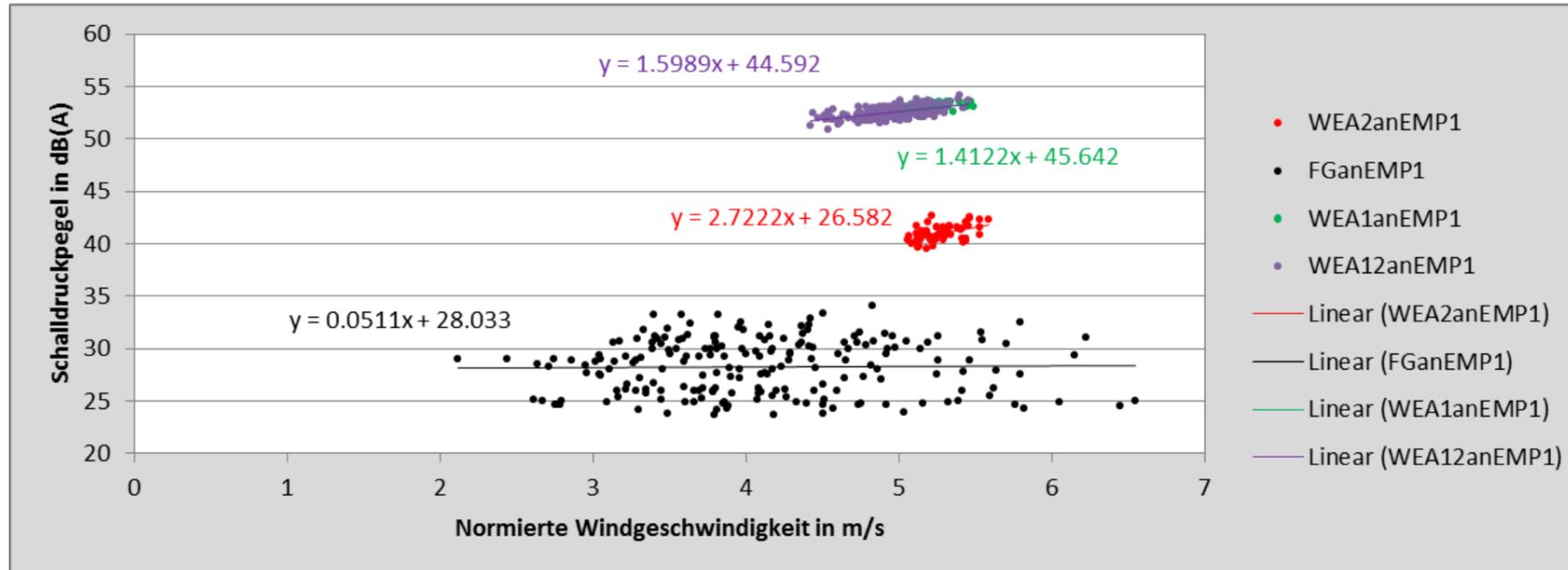
A.2 Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



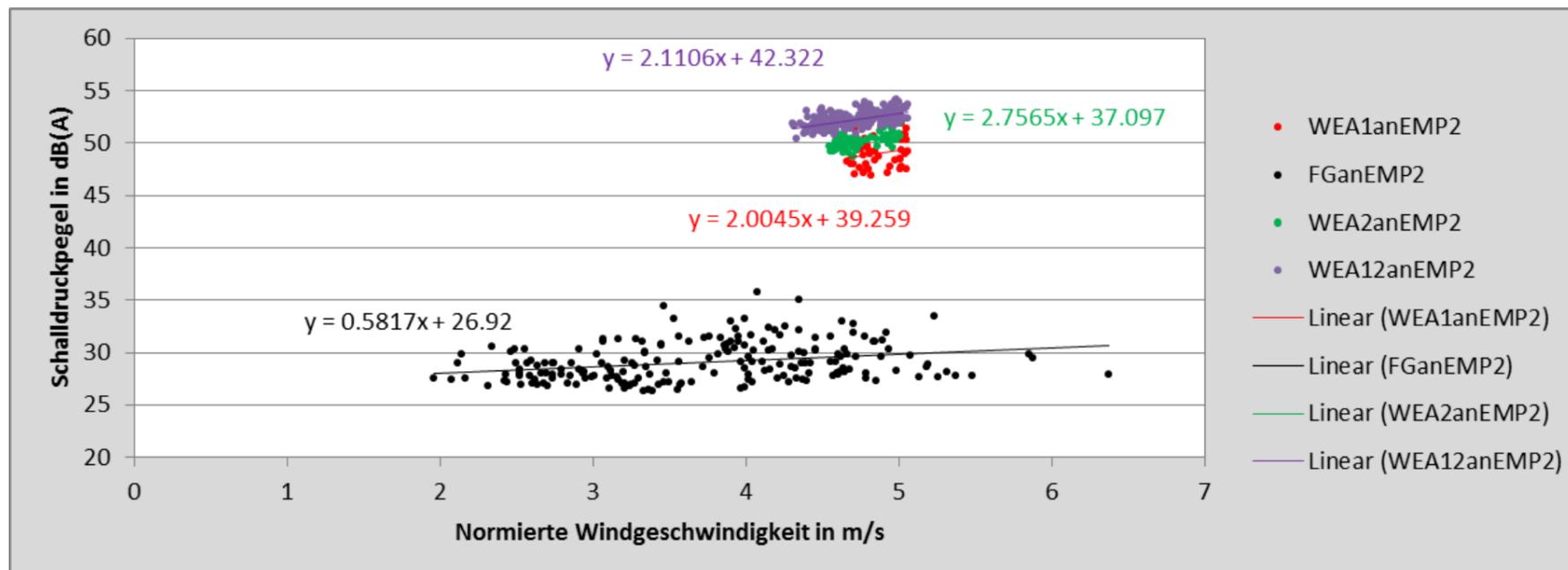
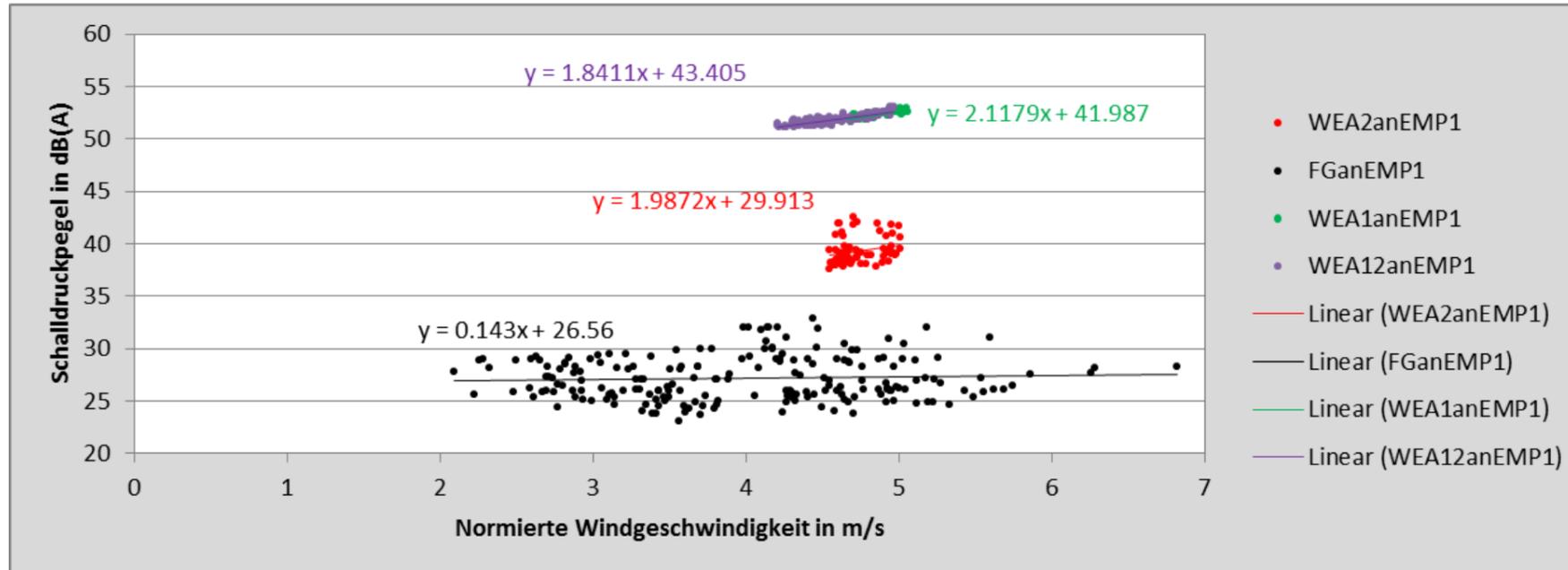
A.2 Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr



A.2 Schalldruckpegel an den Referenzmesspunkten als Funktion der normierten Windgeschwindigkeit

5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr



B Dokumentation der Immissionsmessungen

B.1 Schalldruckpegel und Windgeschwindigkeiten an den Immissionsmesspunkten

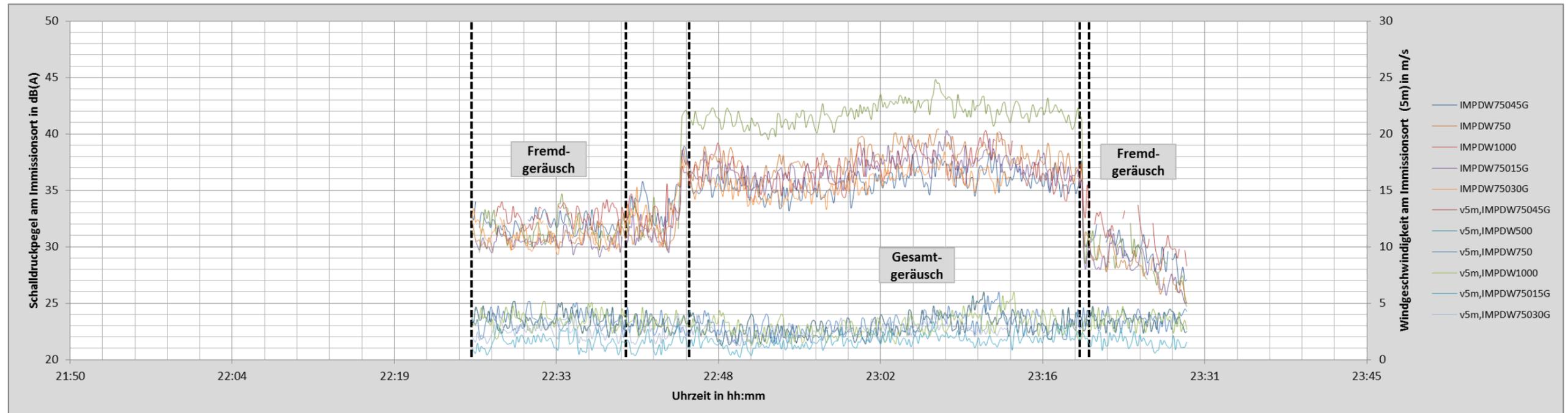
B.2 $L_{Aeq,GG}$ / $L_{Aeq,FG}$ / $L_{Aeq,AG}$ an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

B.3 Repräsentative Terzspektren des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

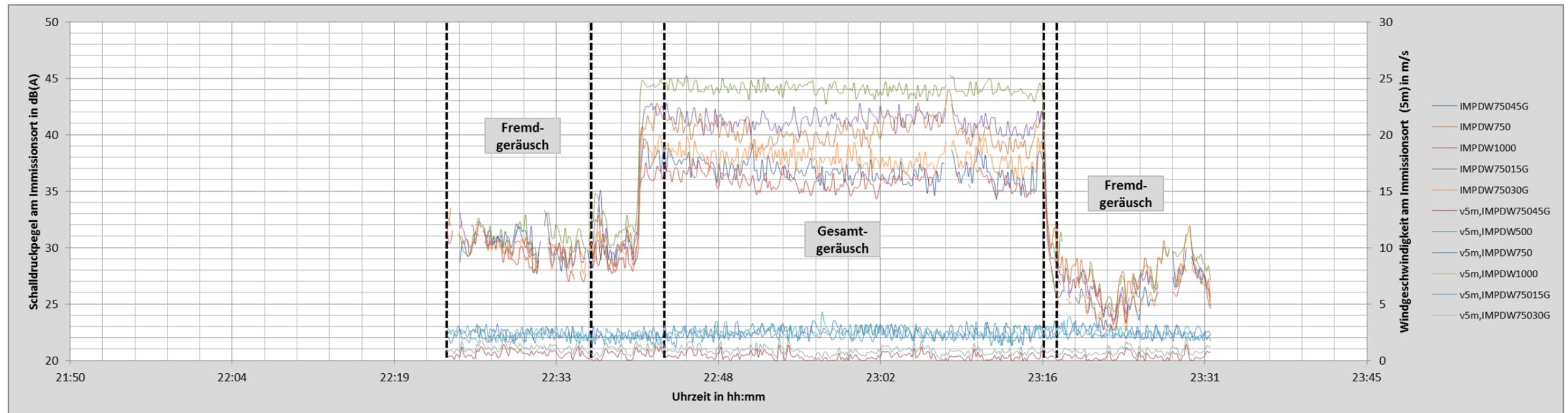


B.1 Schalldruckpegel und Windgeschwindigkeiten an den Immissionsmesspunkten

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

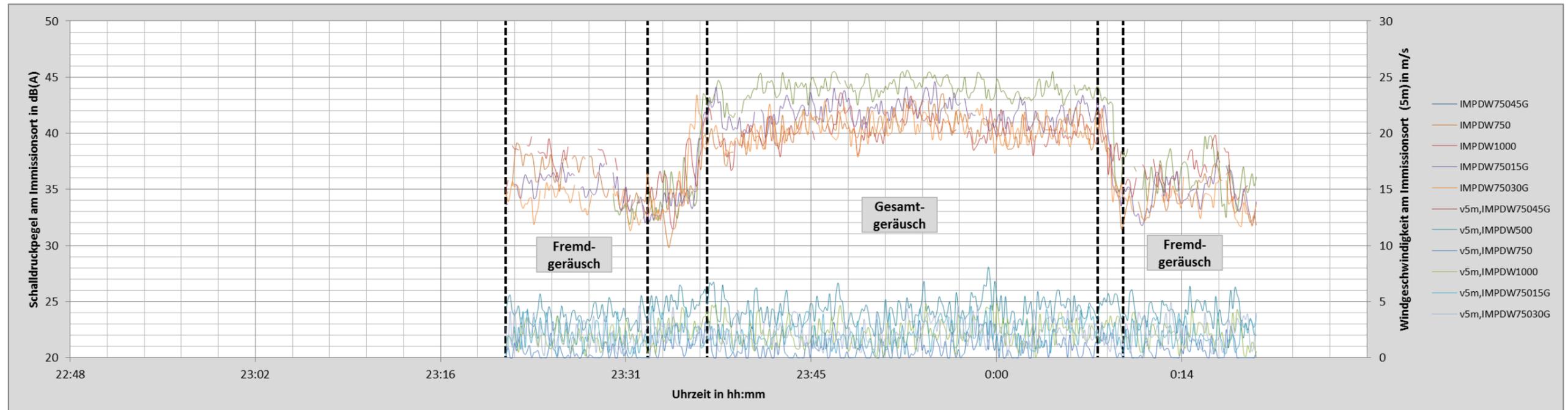


2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr

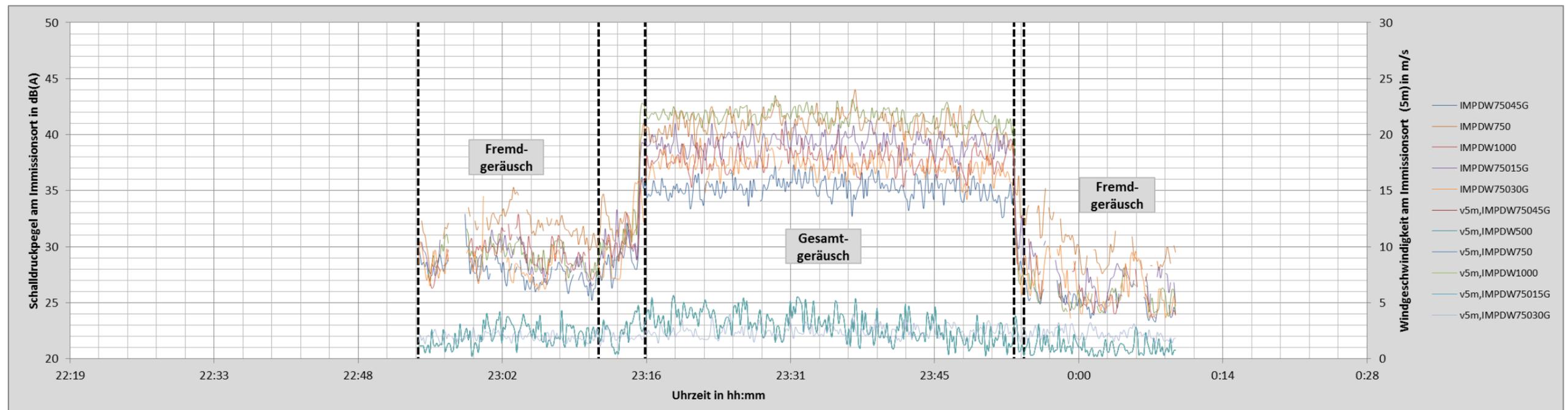


B.1 Schalldruckpegel und Windgeschwindigkeiten an den Immissionsmesspunkten

3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr

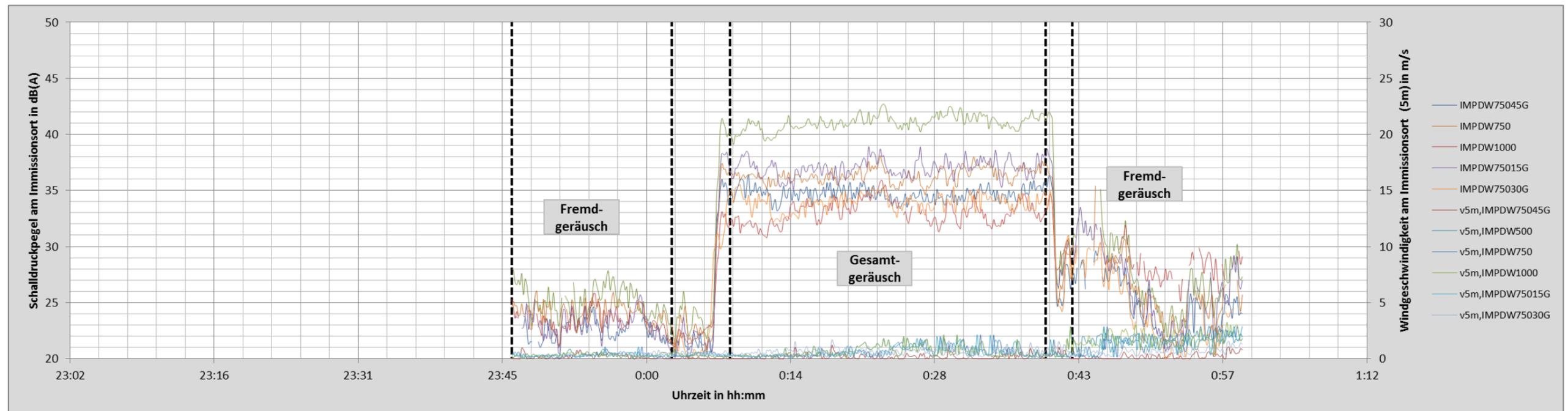


4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr



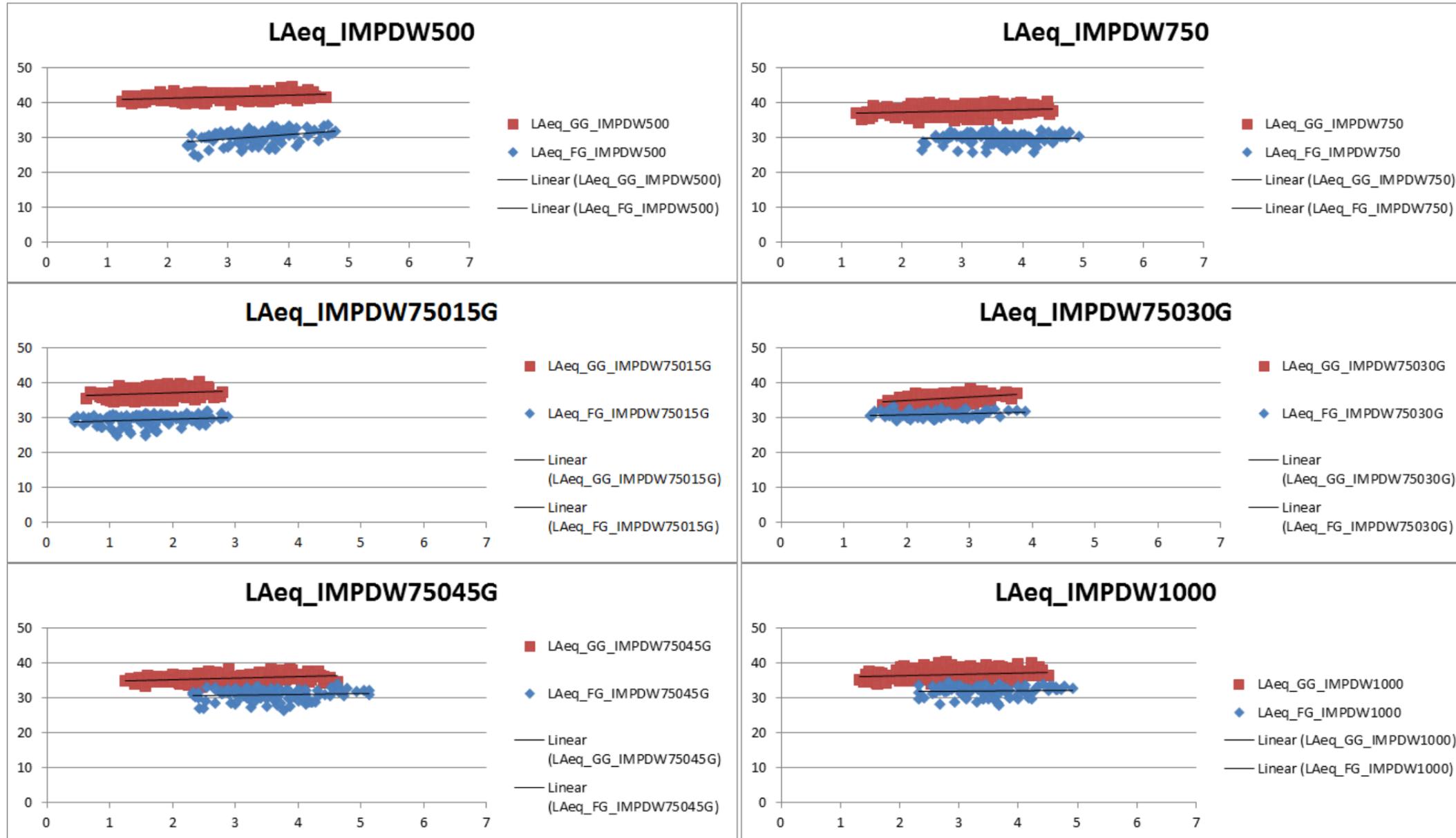
B.1 Schalldruckpegel und Windgeschwindigkeiten an den Immissionsmesspunkten

5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr



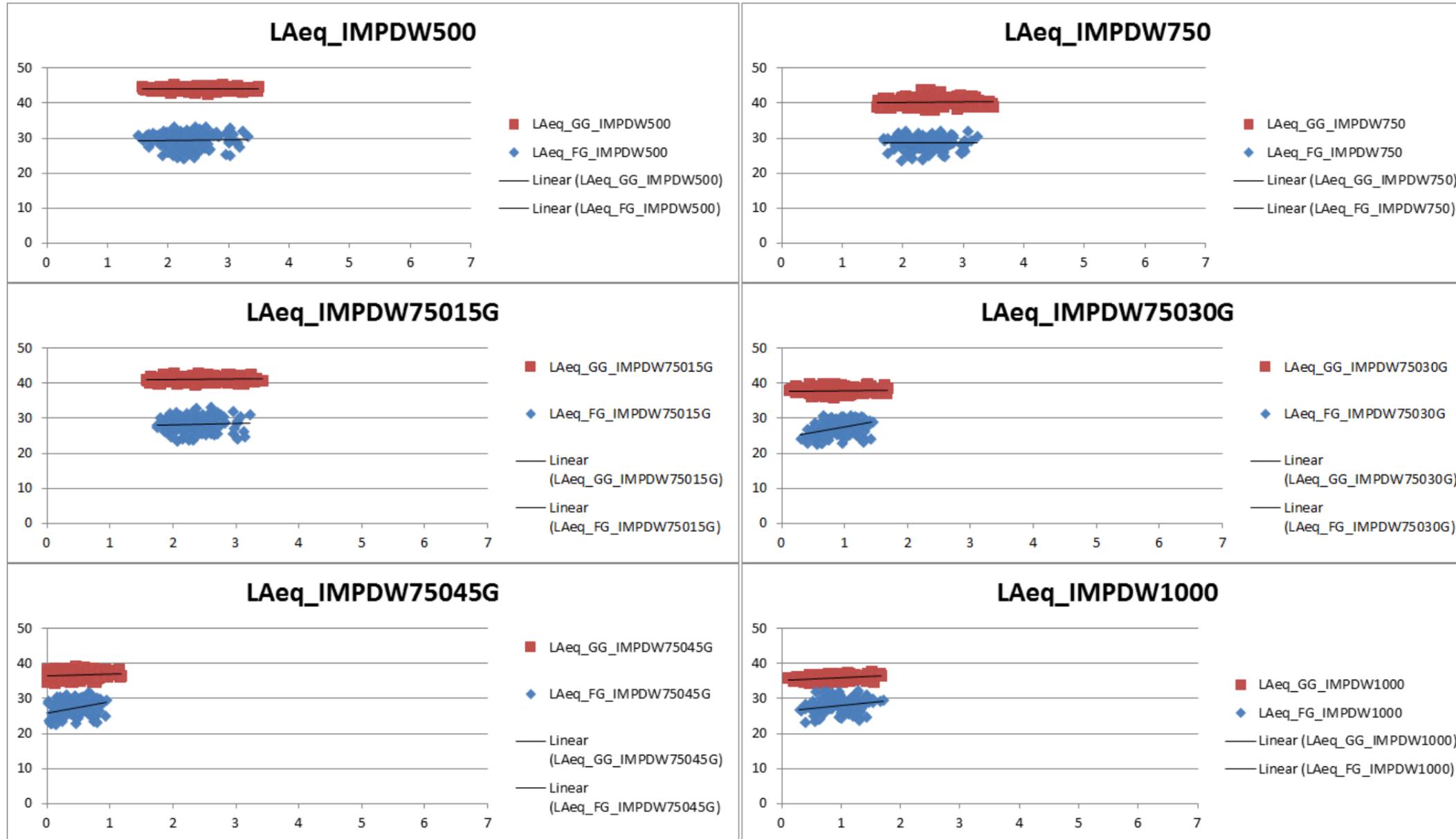
B.2 LAeq,GG / LAeq,FG in dB(A) an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v5m in m/s

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



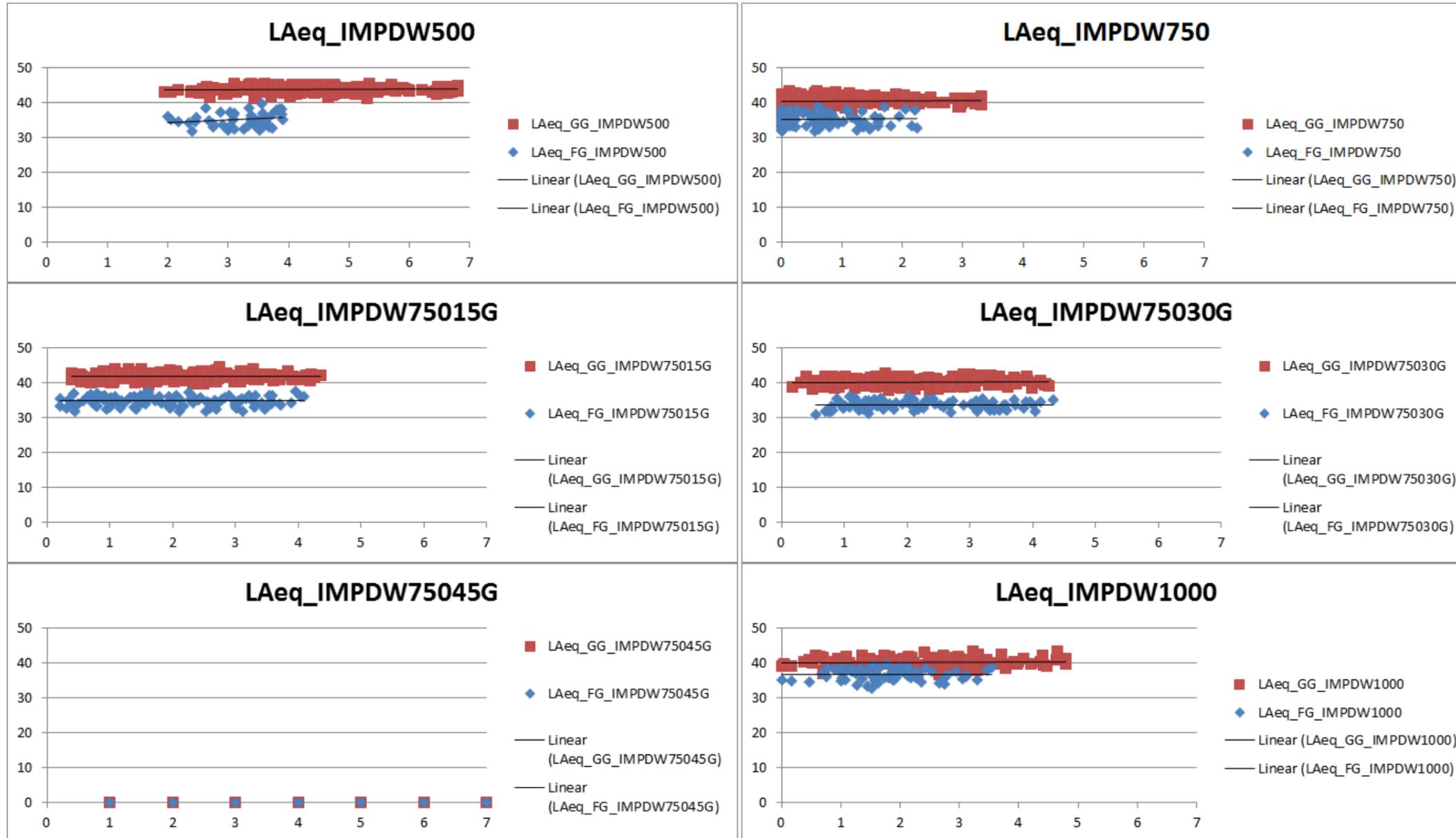
B.2 LAeq,GG / LAeq,FG in dB(A) an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v5m in m/s

2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



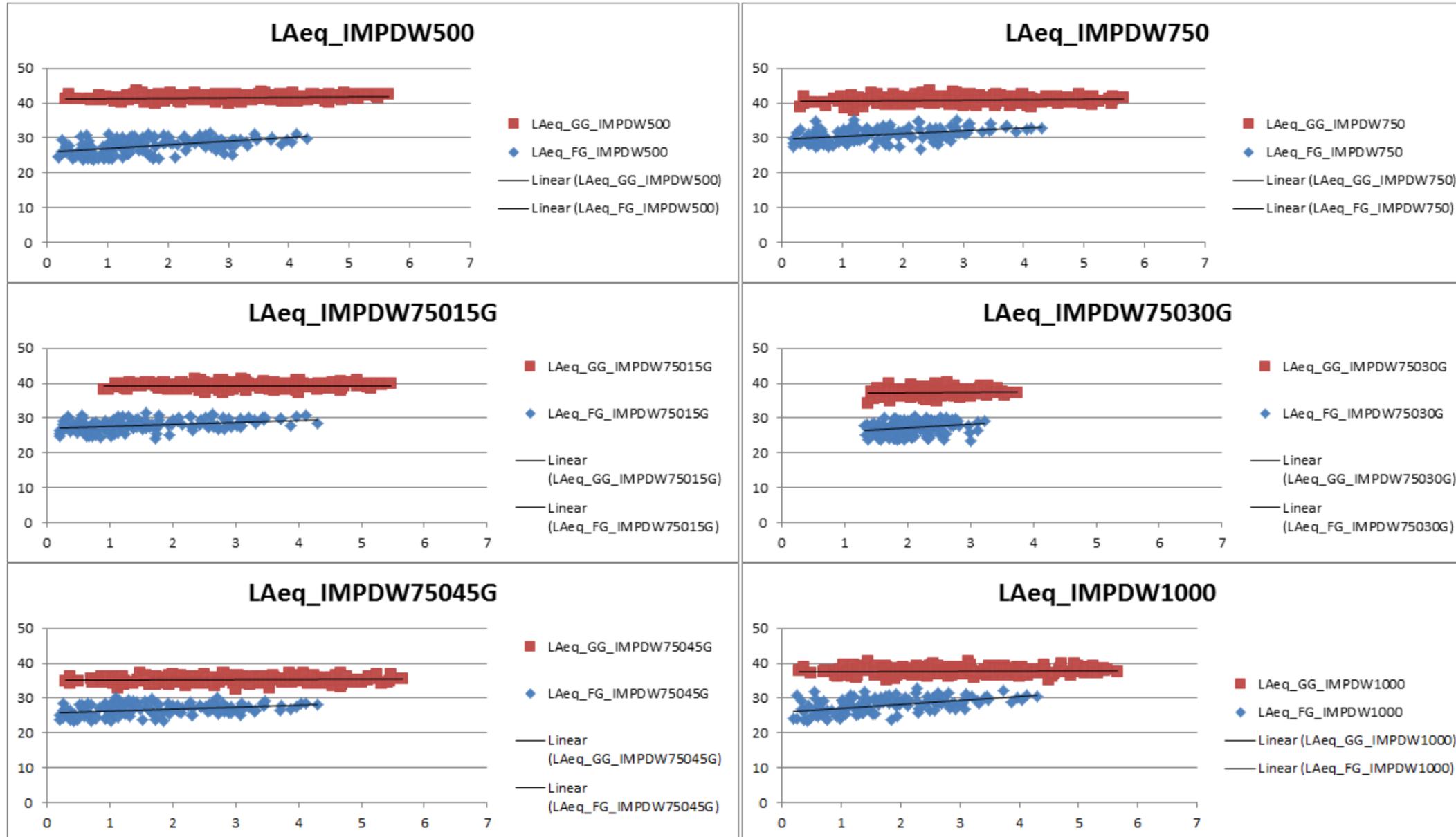
B.2 LAeq,GG / LAeq,FG in dB(A) an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v5m in m/s

3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



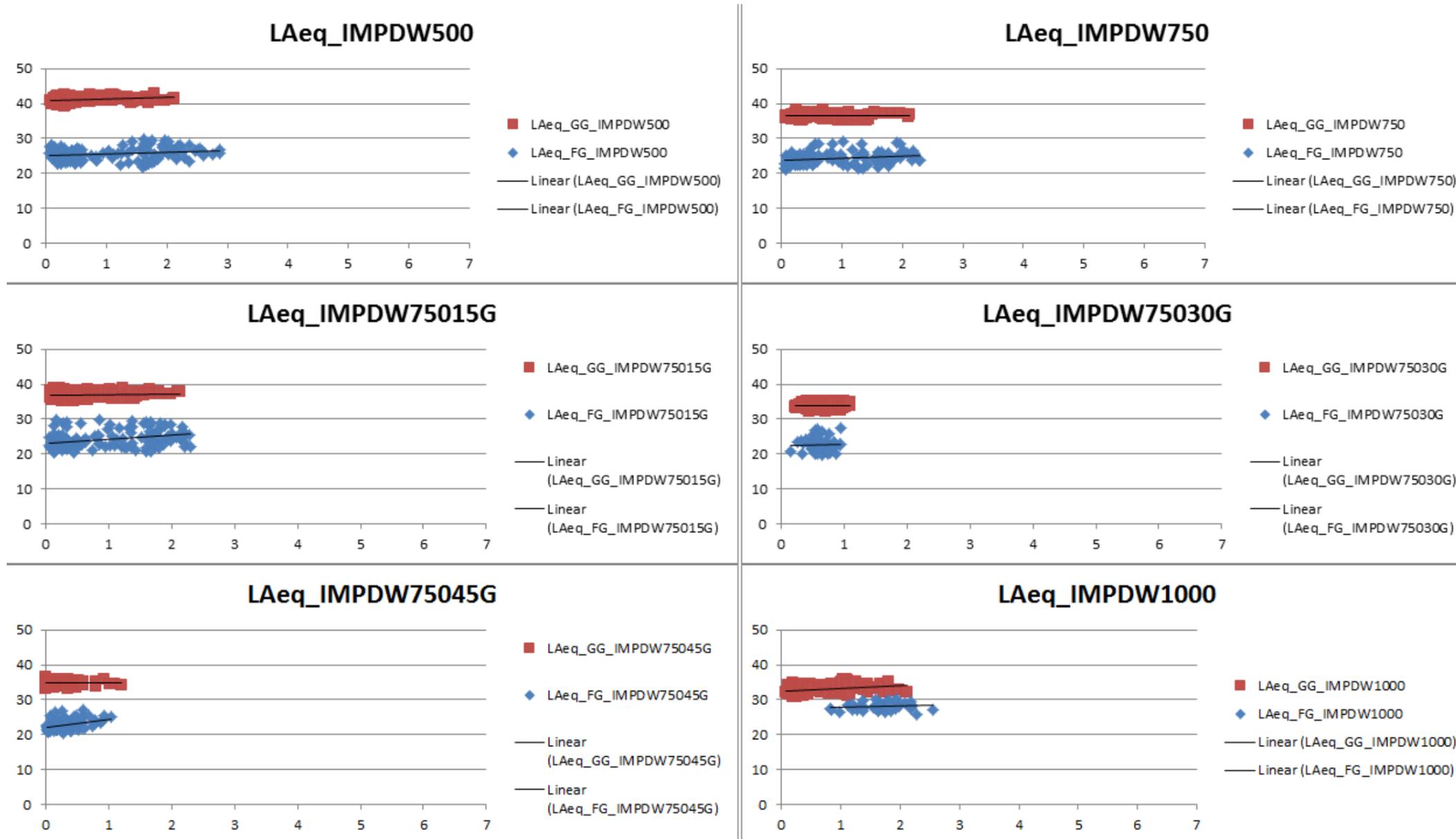
B.2 LAeq,GG / LAeq,FG in dB(A) an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v5m in m/s

4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr



B.2 LAeq,GG / LAeq,FG in dB(A) an den Immissionsmesspunkten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v5m in m/s

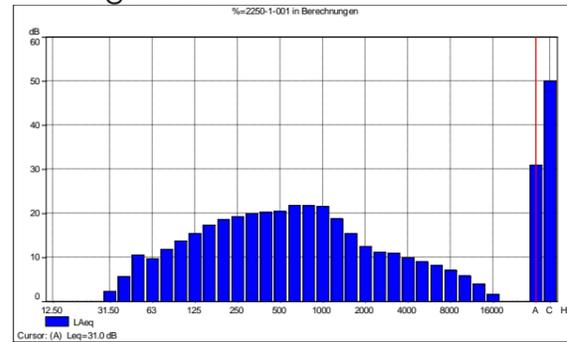
5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr



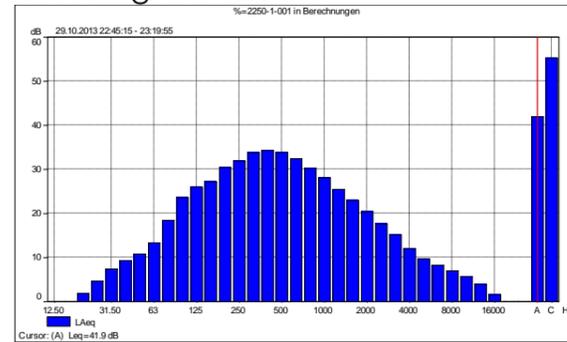
B.3 Repräsentative Terzspektren des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

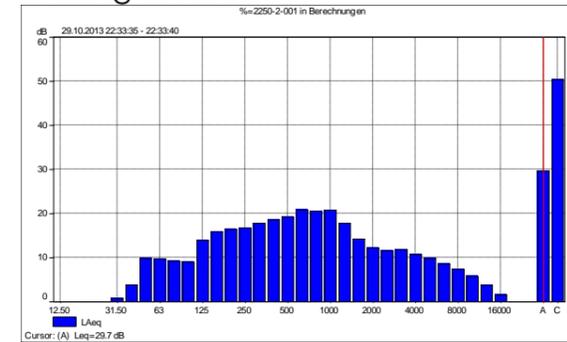
IMPDW500
Fremdgeräusch



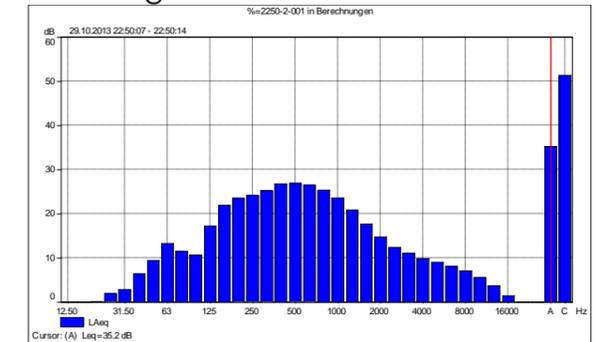
IMPDW500
Gesamtgeräusch



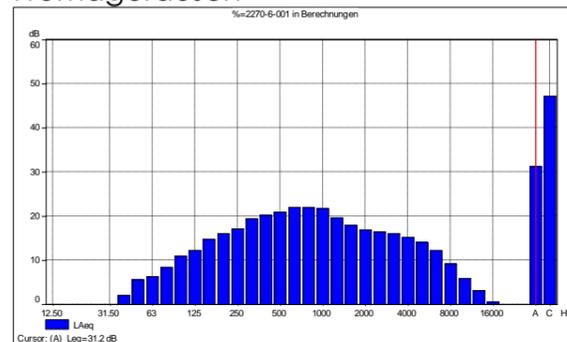
IMPDW750
Fremdgeräusch



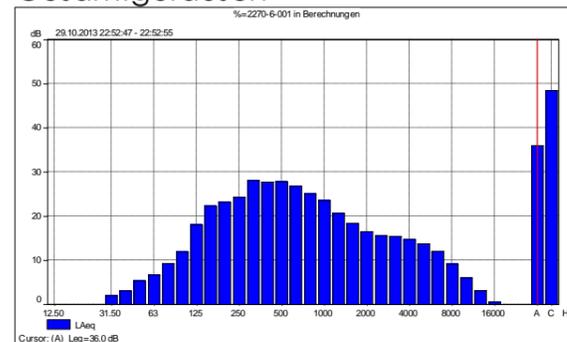
IMPDW750
Gesamtgeräusch



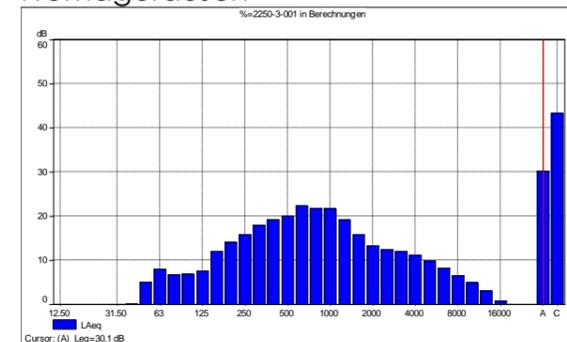
IMPDW1000
Fremdgeräusch



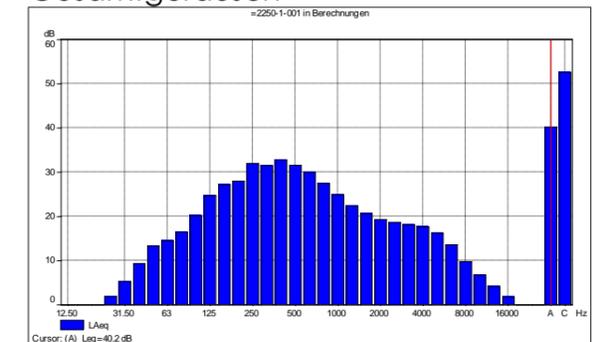
IMPDW1000
Gesamtgeräusch



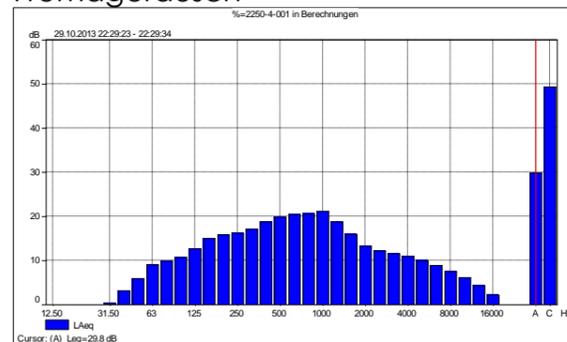
IMPDW75015G
Fremdgeräusch



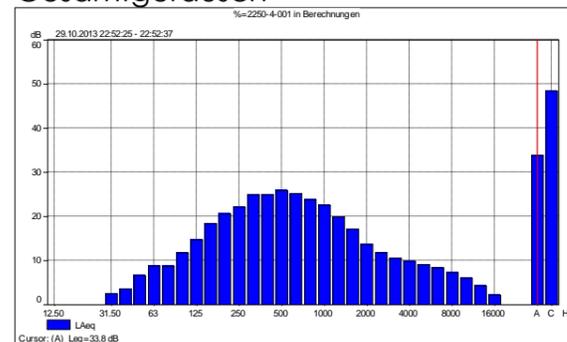
IMPDW75015G
Gesamtgeräusch



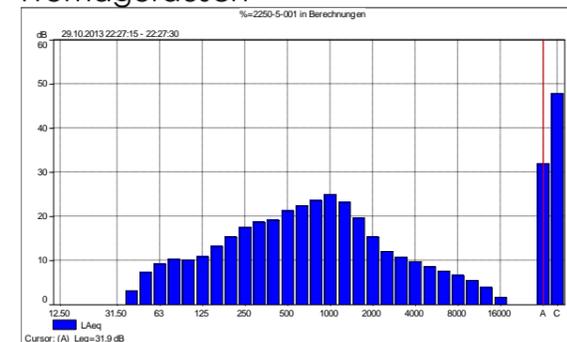
IMPDW75030G
Fremdgeräusch



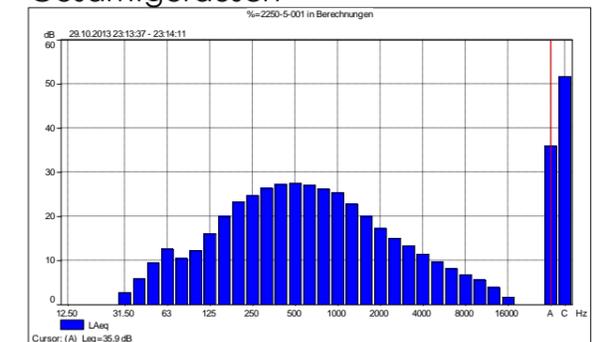
IMPDW75030G
Gesamtgeräusch



IMPDW75045G
Fremdgeräusch



IMPDW75045G
Gesamtgeräusch

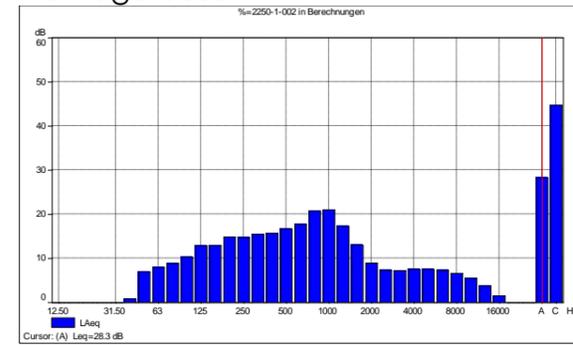


B.3 Repräsentative Terzspektren des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr

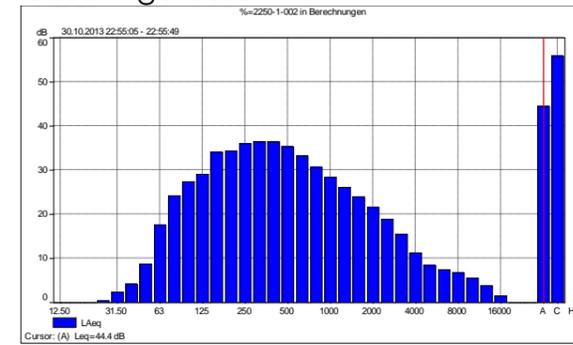
IMPDW500

Fremdgeräusch



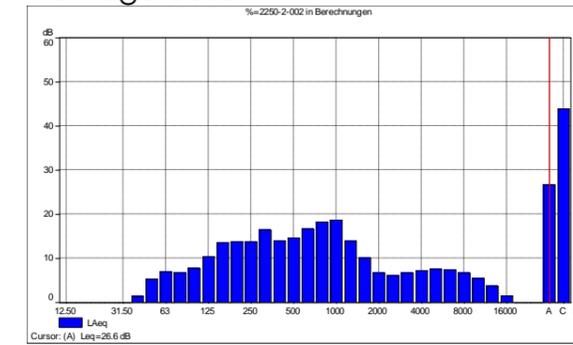
IMPDW500

Gesamtgeräusch



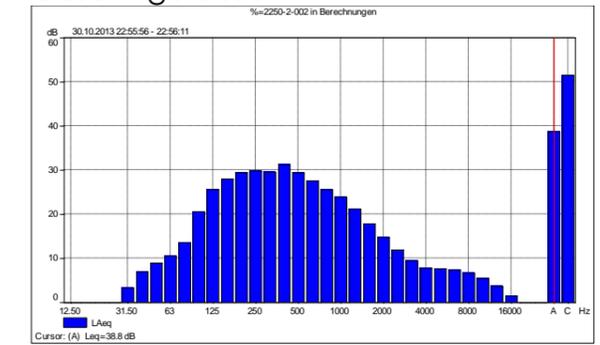
IMPDW750

Fremdgeräusch



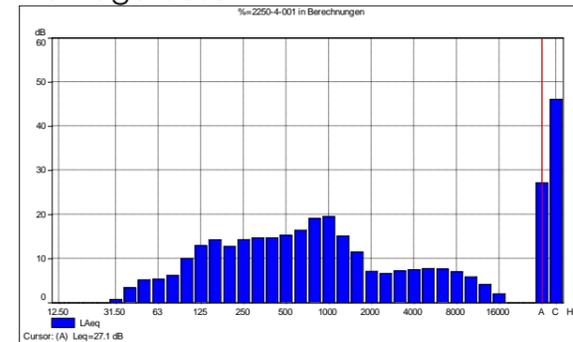
IMPDW750

Gesamtgeräusch



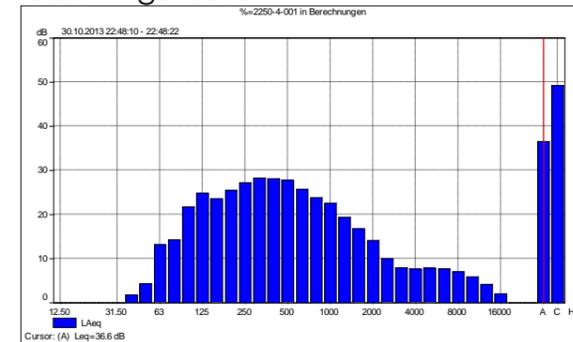
IMPDW1000

Fremdgeräusch



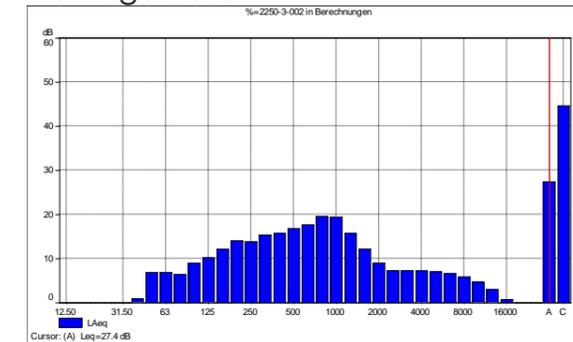
IMPDW1000

Gesamtgeräusch



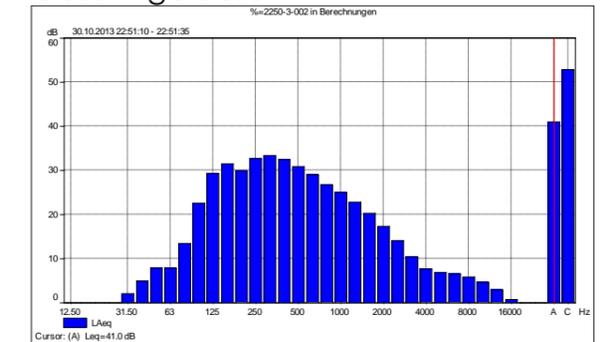
IMPDW75015G

Fremdgeräusch



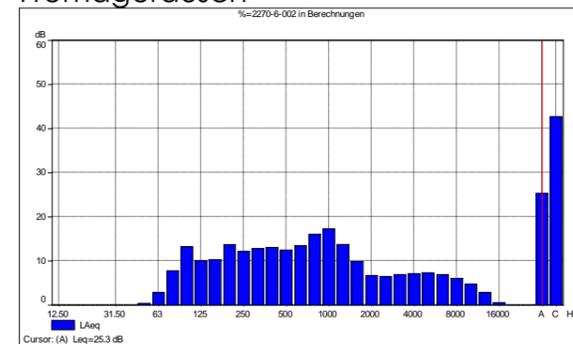
IMPDW75015G

Gesamtgeräusch



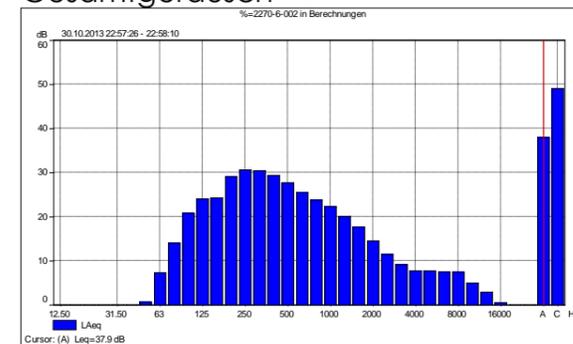
IMPDW75030G

Fremdgeräusch



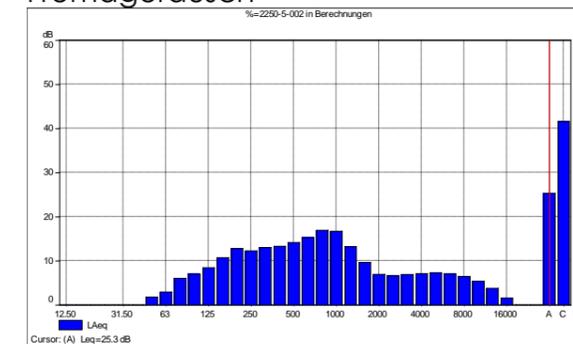
IMPDW75030G

Gesamtgeräusch



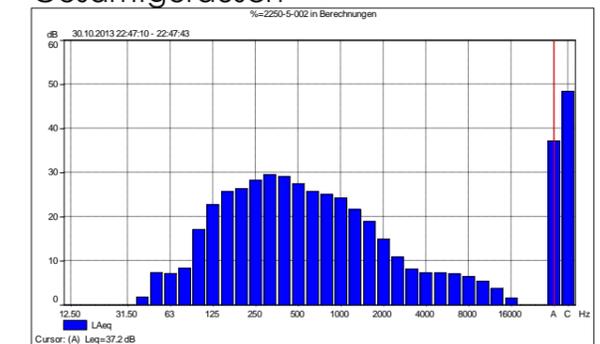
IMPDW75045G

Fremdgeräusch



IMPDW75045G

Gesamtgeräusch

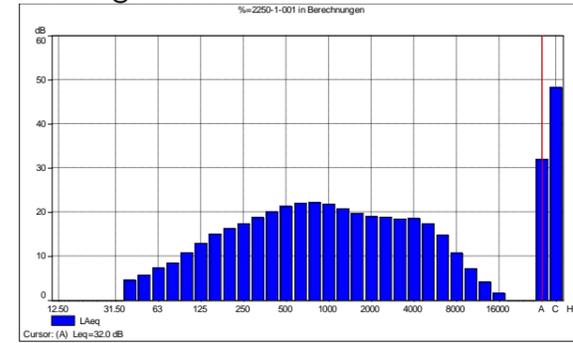


B.3 Repräsentative Terzspektrien des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr

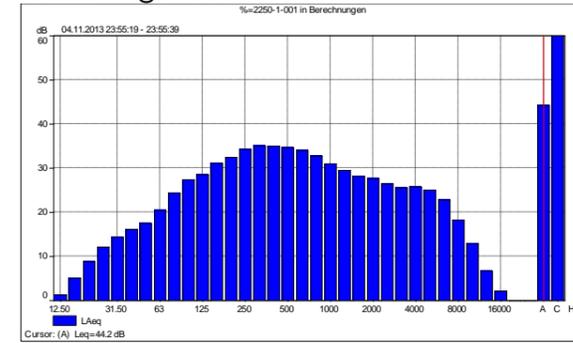
IMPDW500

Fremdgeräusch



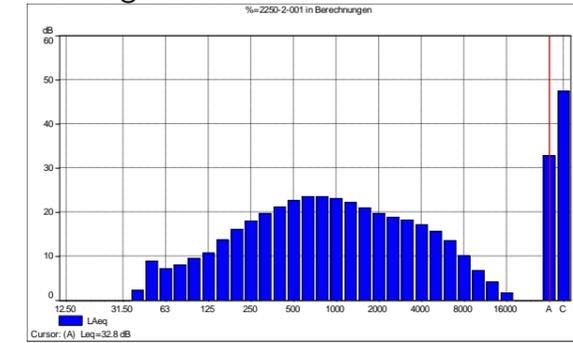
IMPDW500

Gesamtgeräusch



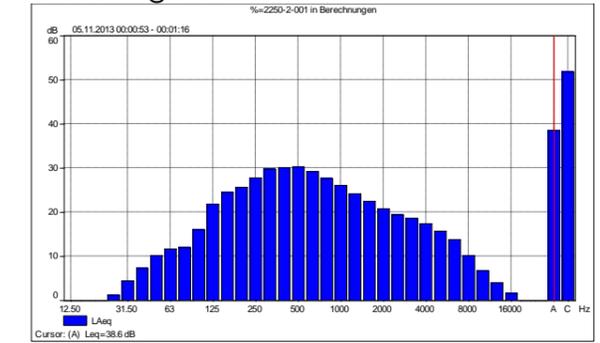
IMPDW750

Fremdgeräusch



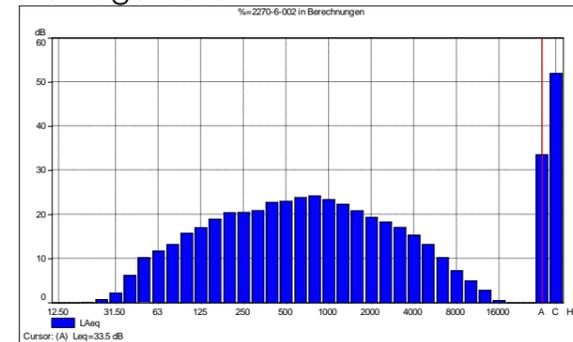
IMPDW750

Gesamtgeräusch



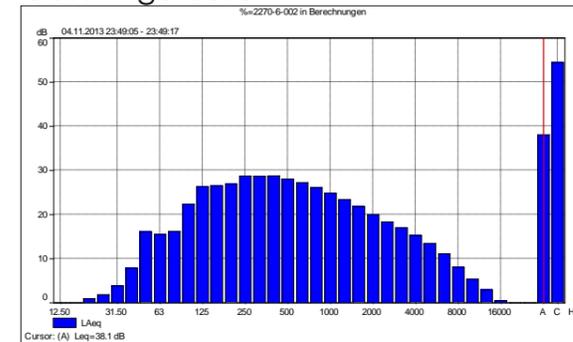
IMPDW1000

Fremdgeräusch



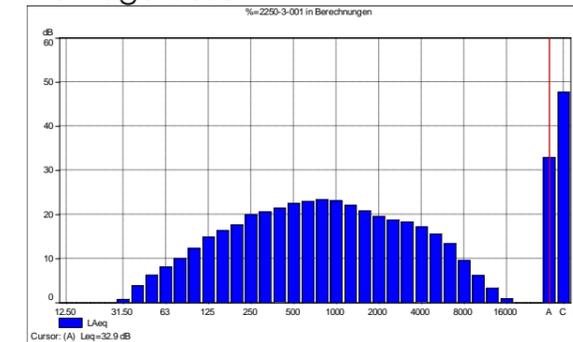
IMPDW1000

Gesamtgeräusch



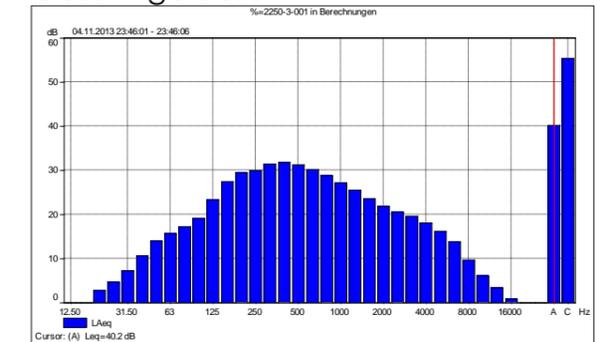
IMPDW75015G

Fremdgeräusch



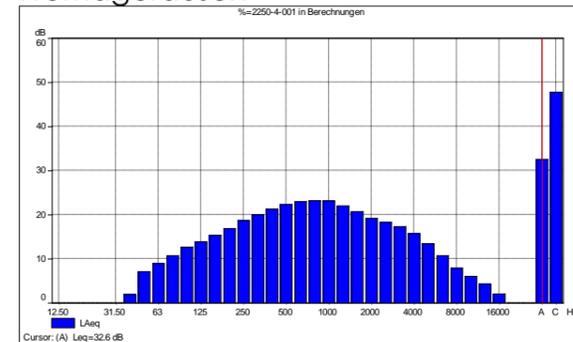
IMPDW75015G

Gesamtgeräusch



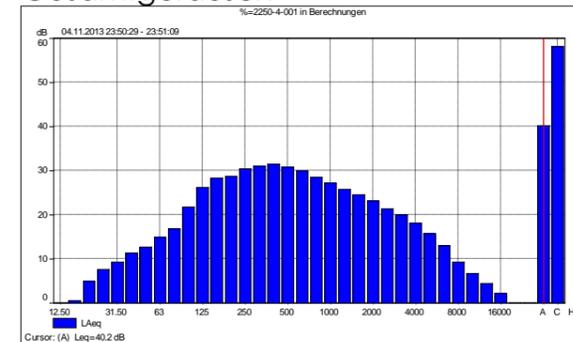
IMPDW75030G

Fremdgeräusch



IMPDW75030G

Gesamtgeräusch



IMPDW75045G

Fremdgeräusch

IMPDW75045G

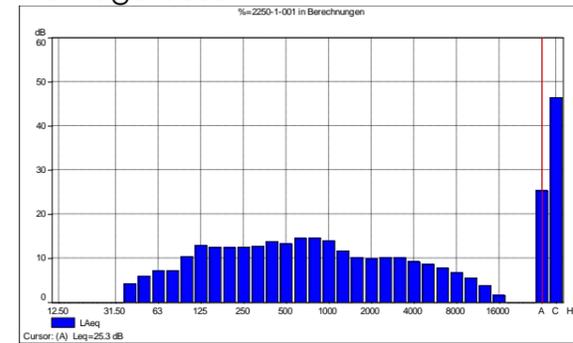
Gesamtgeräusch

B.3 Repräsentative Terzspektren des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr

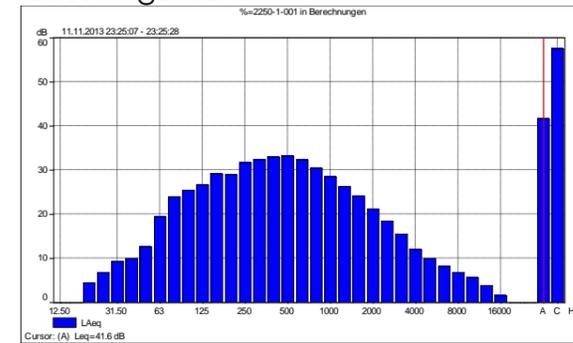
IMPDW500

Fremdgeräusch



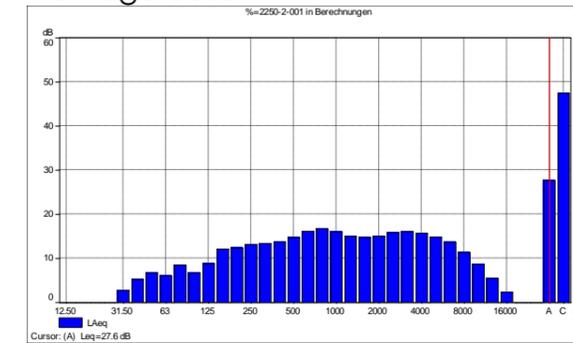
IMPDW500

Gesamtgeräusch



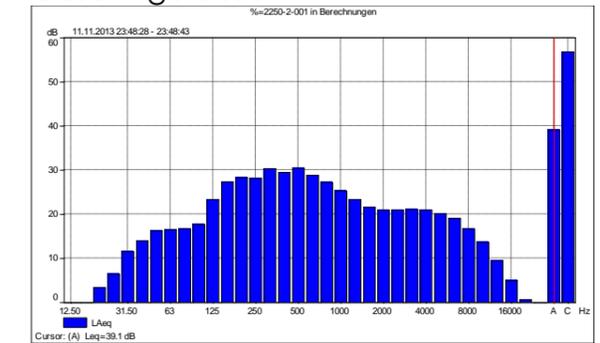
IMPDW750

Fremdgeräusch



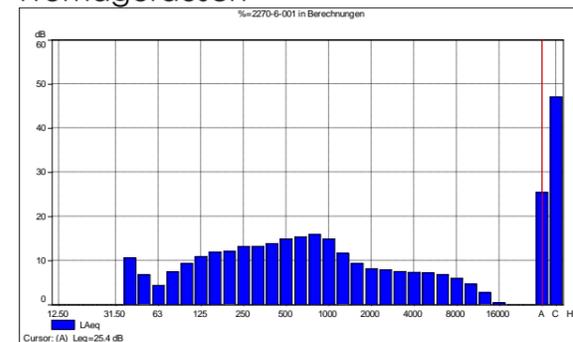
IMPDW750

Gesamtgeräusch



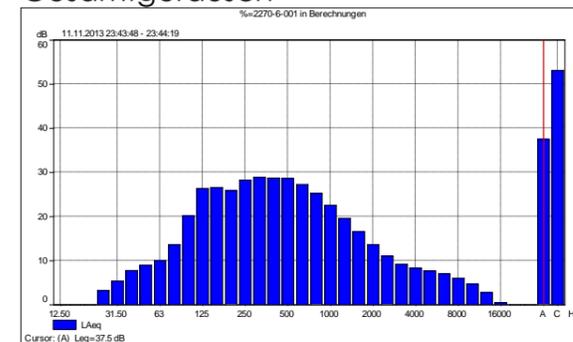
IMPDW1000

Fremdgeräusch



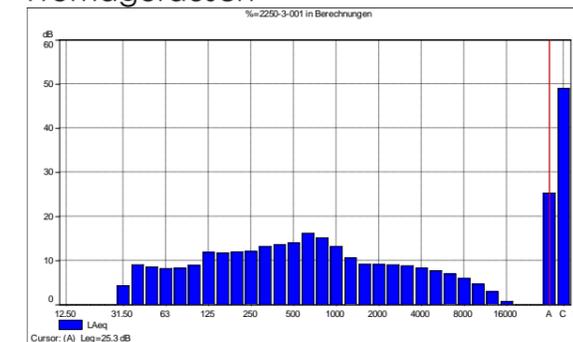
IMPDW1000

Gesamtgeräusch



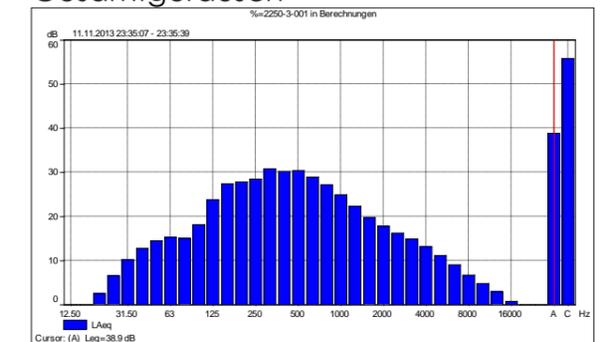
IMPDW75015G

Fremdgeräusch



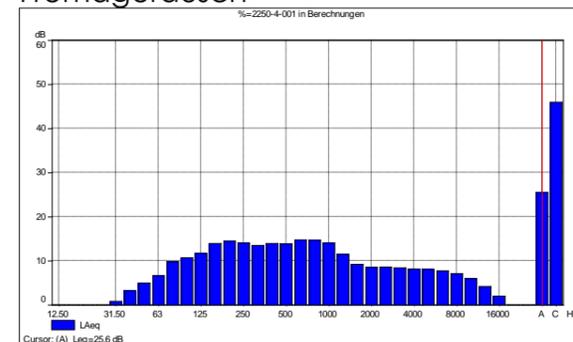
IMPDW75015G

Gesamtgeräusch



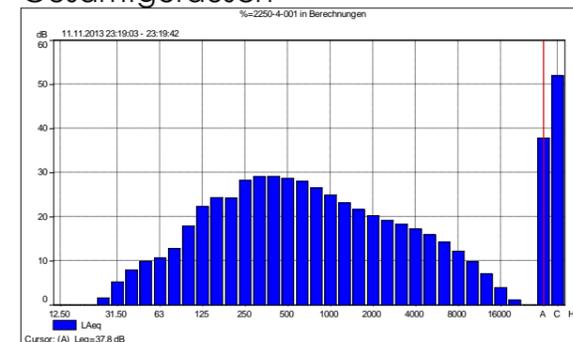
IMPDW75030G

Fremdgeräusch



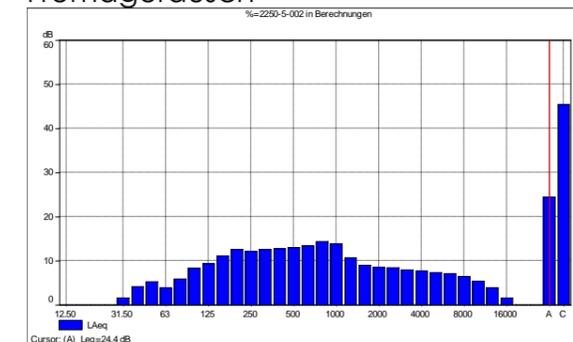
IMPDW75030G

Gesamtgeräusch



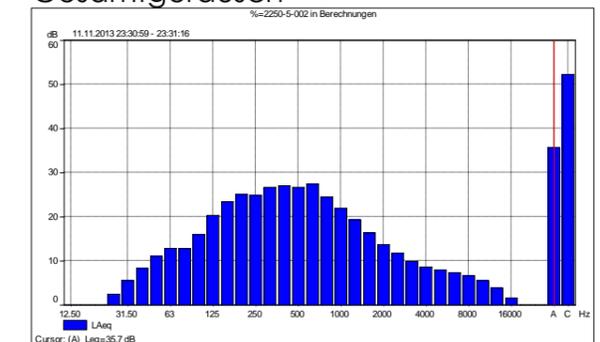
IMPDW75045G

Fremdgeräusch



IMPDW75045G

Gesamtgeräusch

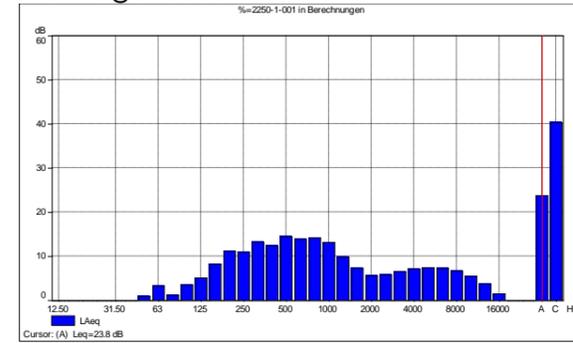


B.3 Repräsentative Terzspektren des Gesamt- und Fremdgeräusches an den Immissionsmesspunkten

5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr

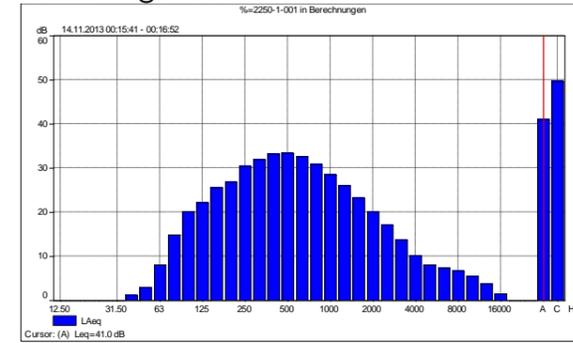
IMPDW500

Fremdgeräusch



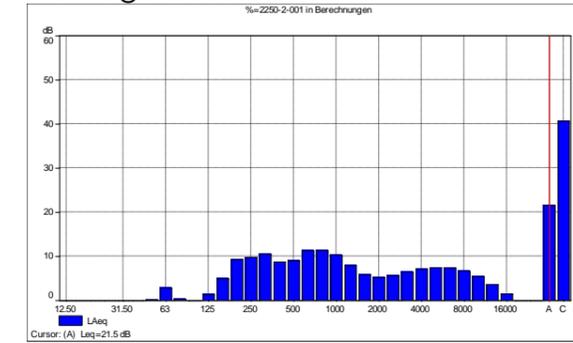
IMPDW500

Gesamtgeräusch



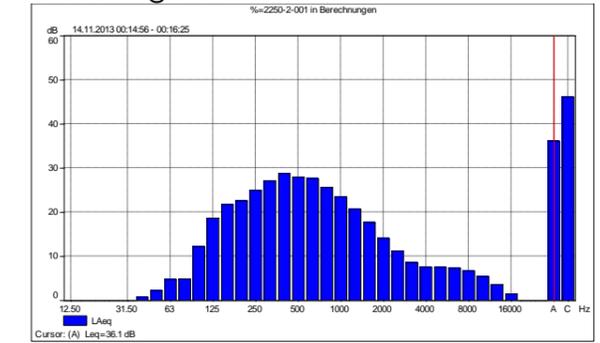
IMPDW750

Fremdgeräusch



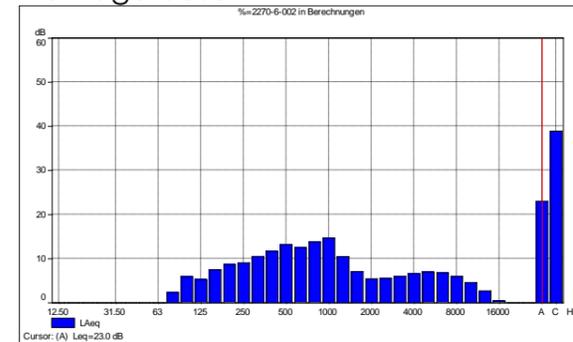
IMPDW750

Gesamtgeräusch



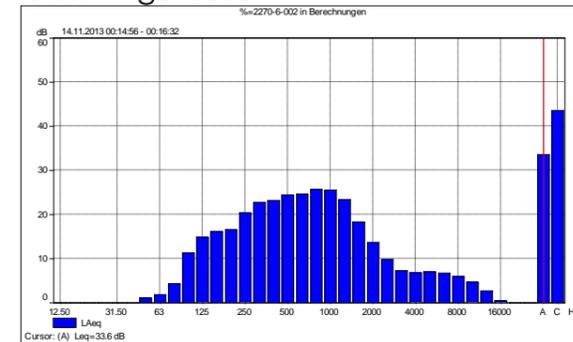
IMPDW1000

Fremdgeräusch



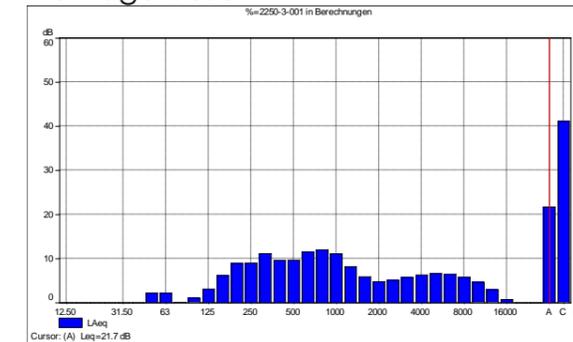
IMPDW1000

Gesamtgeräusch



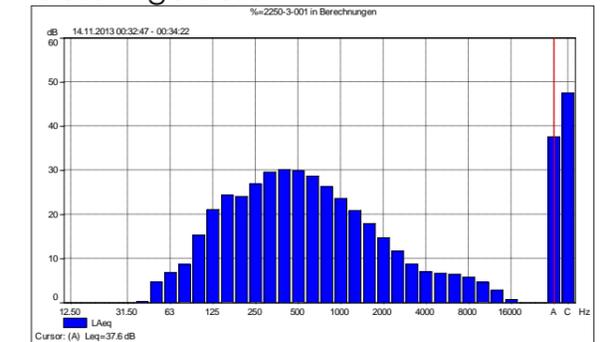
IMPDW75015G

Fremdgeräusch



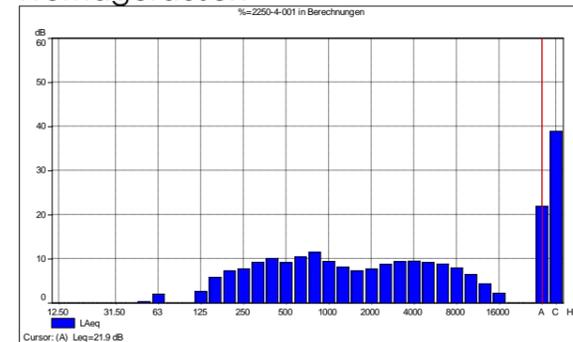
IMPDW75015G

Gesamtgeräusch



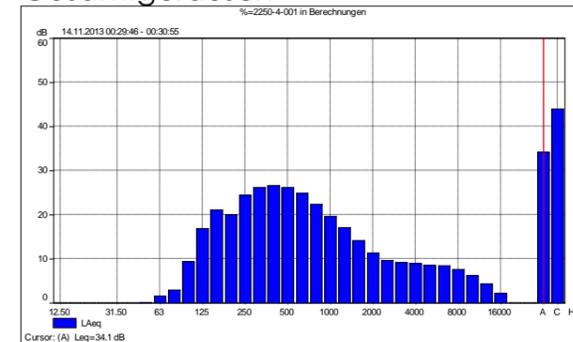
IMPDW75030G

Fremdgeräusch



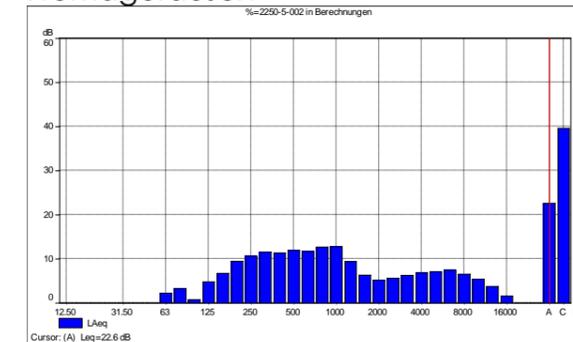
IMPDW75030G

Gesamtgeräusch



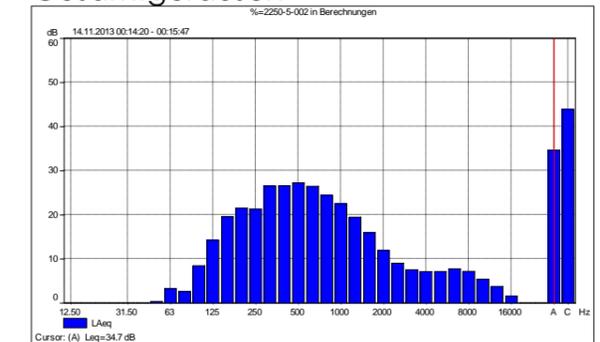
IMPDW75045G

Fremdgeräusch



IMPDW75045G

Gesamtgeräusch



C Dokumentation der Schallausbreitungsberechnungen gemäß DIN ISO 9613-2

C.1 Legende Emissionen

C.2 Legende Immissionen

C.3 Allgemeines Berechnungsverfahren nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 (G=0)

C.3.1 Tabellarisches Emissionskataster

C.3.2 Immissionsberechnungen

C.4 Allgemeines Berechnungsverfahren nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 (G=1)

C.4.1 Tabellarisches Emissionskataster

C.4.2 Immissionsberechnungen

C.5 Alternatives Berechnungsverfahren nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2

C.5.1 Tabellarisches Emissionskataster

C.5.2 Immissionsberechnungen

C.6 Alternatives Berechnungsverfahren nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2 (Agr=0)

C.6.1 Tabellarisches Emissionskataster

C.6.2 Immissionsberechnungen

C.1 Legende Emissionen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Nr.		Laufende Quellenortskennzahl. Quellen mit gleichen Koordinaten (Höhe kann unterschiedlich sein) haben gleiche Nummern
Kommentar		Textliche Beschreibung der Quelle (Angabe je nach Situation)
Emission	dB(A)	Gesamtpegel des verwendeten Emissionsspektrums/Ganzzahlwertes
Bez. Abst.	m	Messabstand zur Quelle. Eintragung ist Grundlage für die Berechnung des Schalleistungspegels. Wenn Eintragung = leer, dann Emissionswert bereits berechnet
num. Add.	dB	Korrekturfaktor, nach Bedarf (z. B. Ruhezeitenzuschläge etc.)
Messfl. / Anzahl	m ²	Eintragung der Messfläche bzw. die Fläche des schallabstrahlenden Bauteiles. Eintragung ist Grundlage für die Berechnung des Schalleistungspegels. Wenn Eintragung = leer, dann Emissionswert bereits berechnet. Bei Fahrbewegungen gibt die Zahl die Anzahl der Fahrzeuge auf der dazugehörigen Teilstrecke wieder.
R+C _a Mw	dB	Das bewertete Bauschalldämmmaß des jeweiligen Bauteiles in dB. Der Diffusionstherm C _d nach DIN EN 12354-4:2000 gibt den Abzugswert für den Übergang vom Diffusfeld ins Freifeld bei der Schallabstrahlung über die Umfassungsbauteile von Räumen an. Der Diffusionstherm beträgt im Standardfall 6 dB.
MM	dB	Minderungsmaßnahmen an der Quelle, quantitative Eintragung. Wird je nach Berechnungsart mit berücksichtigt oder nicht berücksichtigt
Einw.-T	h	Eintragung der Einwirkzeit. Eingaben mit einem Minuszeichen entsprechen einer Einwirkzeit in Sekunden (z. B. -0,50 = 50 Sek.). Keine Eingabe: Einwirkzeit = ges. Beurteilungszeitraum
v	km/h	Geschwindigkeit einer bewegten Linienquelle. Über die Geschwindigkeit berechnet das Programm die Einwirkzeit der Quelle
hQ	m	Höhe der Emissionsquelle
Lw (LmE)	dB(A)	Ergebnisgrößen aus Emission, Zuschlägen für Anzahl, Messfläche, Entfernung etc. sowie Abzügen für Schalldämmung (ohne zeitliche Korrektur)
Einw. T Nacht	h	Einwirkzeit zur Nacht, wenn = 0, dann keine Berücksichtigung zur Nachtzeit, wenn auch Eintragung in Einw.-T, dann Beurteilungszeit für die Quelle
Einw. T Tag	h	Einwirkzeit am Tag, wenn = 0, dann keine Berücksichtigung zur Tageszeit, wenn auch Eintragung in Einw.-T, dann Beurteilungszeit für die Quelle
Einw. Ruhezeit	h	Einwirkzeit der Quelle innerhalb der Ruhezeit
Lw/LmE* Nacht	dB(A)	Ergebnisgrößen aus Emission, Zuschlägen für Anzahl, Messfläche, Entfernung etc. sowie Abzügen für Schalldämmung inkl. zeitlicher Korrektur
Lw/LmE* Tag	dB(A)	Ergebnisgrößen aus Emission, Zuschlägen für Anzahl, Messfläche, Entfernung etc. sowie Abzügen für Schalldämmung inkl. zeitlicher Korrektur

Bei den aufgelisteten Spalten ist zu beachten, dass je nach Projekt nicht alle Spalten für die Berechnung genutzt und entsprechend dokumentiert werden.



C.2 Legende Immissionen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Nr.		Laufende Quellenortskennzahl. Quellen mit gleichen Koordinaten (Höhe kann unterschiedlich sein) haben gleiche Nummern
Kommentar		Textliche Beschreibung der Quelle (Angabe je nach Situation)
LW	dB(A)	Schalleistungspegel der Emissionsquelle
DT	dB	Korrekturwert für die Einwirkzeit im Verhältnis zum Beurteilungszeitraum oder Einwirkzeit
MM	dB	Minderungsmaßnahmen an der Quelle. Wenn die Eintragung = leer, bleibt die Minderungsmaßnahme zur Berechnung von LAT unberücksichtigt (siehe auch LAT)
D0	dB	Raumwinkelmaß
cmet	dB	Meteorologie-Korrektur-Faktor; Größe abhängig von der Lage des Immissionsortes zur Emissionsquelle und der Hauptwindrichtung in dem jeweiligen Gebiet
+RT	dB	Ruhezeitenzuschlag
dp	m	Horizontaler Abstand der Emissionsquelle (akustischer Schwerpunkt) zum Immissionsort
DI	dB	Richtwirkungsmaß
Abar	dB	Einfügungsdämmmaß eines Hindernisses (z. B. eines Schallschirmes)
Adiv	dB	Abstandsmaß
Aatm	dB	Luftabsorptionsmaß
Agr	dB	Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß, je nach Berechnungsverfahren ist das Raumwinkelmaß für den Boden in dem Wert enthalten
Refl.-Ant.	dB	Reflexionsanteil an senkrechten Oberflächen und Decken bzw. Dächern
LAT	dB	Schalldruckpegel der Emissionsquelle am Immissionspunkt. Je nach Berechnungsart (siehe Tabellenkopf o. re.) ist LAT ohne Berücksichtigung der Minderungsmaßnahmen (Minder. bzw. MM) oder mit Berücksichtigung der Minderungsmaßnahmen angegeben (LAT(T) oder LAT(T,M))

Bei den aufgelisteten Spalten ist zu beachten, dass je nach Projekt nicht alle Spalten für die Berechnung genutzt und entsprechend dokumentiert werden.

C.3 Allgemeines Berechnungsverfahren nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 (G=0)

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

C.3.1 Tabellarisches Emissionskataster

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m ²) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5								98.3	101.5
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9								98.3	100.9
GS											104.2

C.3.2 Immissionsberechnungen

IMPDW500

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						461.7			64.3	0.8	-3.0		39.3
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						580.3			66.3	1.2	-3.0		36.4
GS															41.1

IMPDW750

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						717.6			68.1	1.2	-3.0		35.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						829.8			69.4	1.6	-3.0		32.9
GS															37.1

IMPDW75015G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						732.2			68.3	1.3	-3.0		34.9
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						771.0			68.7	1.5	-3.0		33.7
GS															37.4

IMPDW75030G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						784.7			68.9	1.3	-3.0		34.2
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						730.6			68.3	1.5	-3.0		34.2
GS															37.2

IMPDW75045G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						805.5			69.1	1.4	-3.0		34.0
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						690.0			67.8	1.4	-3.0		34.8
GS															37.4

IMPDW1000

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						953.6			70.6	1.6	-3.0		32.3
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						1048.7			71.4	2.0	-3.0		30.5
GS															34.5

C.4 Allgemeines Berechnungsverfahren nach 7.3.1 DIN ISO 9613-2 (G=1)

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

C.4.1 Tabellarisches Emissionskataster

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5								98.3	101.5
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9								98.3	100.9
GS											104.2

C.4.2 Immissionsberechnungen

IMPDW500

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						461.7			64.3	1.0	1.1		35.3
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						580.3			66.3	1.3	0.8		32.7
GS															37.2

IMPDW750

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						717.6			68.1	1.4	1.1		31.0
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						829.8			69.4	1.8	0.8		29.1
GS															33.2

IMPDW75015G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						732.2			68.3	1.4	1.1		30.8
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						771.0			68.7	1.7	0.8		29.9
GS															33.4

IMPDW75030G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						784.7			68.9	1.5	1.2		30.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						730.6			68.3	1.6	0.8		30.4
GS															33.3

IMPDW75045G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						805.5			69.1	1.6	1.2		29.8
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						690.0			67.8	1.5	0.8		31.0
GS															33.5

IMPDW1000

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
	Messung1														
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5						953.6			70.6	1.8	1.2		28.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9						1048.7			71.4	2.2	0.9		26.7
GS															30.5

C.5 Alternatives Berechnungsverfahren nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

C.5.1 Tabellarisches Emissionskataster

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m ²) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)	Einw.T Nacht (0=aus)	Einw.T Tag (0=aus)	Einw.T Ruhe- zeit	Lw/LmE Nacht dB(A) *
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5								98.3	101.5		0.00	0.00	101.5
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9								98.3	100.9		0.00	0.00	100.9
GS											104.2				

C.5.2 Immissionsberechnungen

IMPDW500

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			461.7			64.3	0.9	0.8		38.5
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			580.3			66.3	1.1	1.7		34.8
GS															40.0

IMPDW750

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			717.6			68.1	1.4	2.3		32.7
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			829.8			69.4	1.6	2.6		30.3
GS															34.7

IMPDW75015G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			732.2			68.3	1.4	2.3		32.5
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			771.0			68.7	1.5	2.5		31.2
GS															34.9

IMPDW75030G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			784.7			68.9	1.5	2.5		31.6
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			730.6			68.3	1.4	2.3		31.9
GS															34.8

IMPDW75045G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			805.5			69.1	1.6	2.6		31.3
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			690.0			67.8	1.3	2.2		32.6
GS															35.0

IMPDW1000

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5			3.0			953.6			70.6	1.8	2.9		29.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9			3.0			1048.7			71.4	2.0	3.1		27.4
GS															31.3

C.6 Alternatives Berechnungsverfahren nach 7.3.2 DIN ISO 9613-2 (Agr=0)

1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr

C.6.1 Tabellarisches Emissionskataster

für die Berechnung am IMPDW500

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		0.8						98.3	102.3
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		1.7						98.3	102.6
GS											105.5

für die Berechnung am IMPDW750

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		2.3						98.3	103.8
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		2.6						98.3	103.5
GS											106.7

für die Berechnung am IMPDW75015G

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		2.3						98.3	103.8
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		2.5						98.3	103.4
GS											106.6

für die Berechnung am IMPDW75030G

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		2.5						98.3	104.0
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		2.3						98.3	103.2
GS											106.6

für die Berechnung am IMPDW75045G

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		2.6						98.3	104.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		2.2						98.3	103.1
GS											106.6

für die Berechnung am IMPDW1000

Nr.	Kommentar	Emis- sion dB(A)	Bez. Abst m	num. Add. dB(A)	Messfl. (m2) Anzahl	R+Cd Mw dB	MM dB	Einw.T h (- s/100)	v km/ h	hQ m	Lw (LmE) dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	101.5		2.9						98.3	104.4
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	100.9		3.1						98.3	104.0
GS											107.2

C.6.2 Immissionsberechnungen

IMPDW500

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	102.3			3.0			461.7			64.3	0.8	0.8		39.4
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	102.6			3.0			580.3			66.3	1.0	1.7		36.6
GS															41.2

IMPDW750

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	103.8			3.0			717.6			68.1	1.3	2.3		35.1
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	103.5			3.0			829.8			69.4	1.5	2.6		33.0
GS															37.2

IMPDW75015G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	103.8			3.0			732.2			68.3	1.3	2.3		34.8
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	103.4			3.0			771.0			68.7	1.4	2.5		33.8
GS															37.3

IMPDW75030G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	104.0			3.0			784.7			68.9	1.4	2.5		34.2
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	103.2			3.0			730.6			68.3	1.3	2.3		34.3
GS															37.3

IMPDW75045G

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	104.1			3.0			805.5			69.1	1.5	2.6		34.0
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	103.1			3.0			690.0			67.8	1.2	2.2		34.9
GS															37.5

IMPDW1000

Nr.	Kommentar	Lw (LmE) dB(A)	DT dB	MM dB	Do dB	Cmet dB	+RT dB	dp m	DI dB	Abar dB	Adiv dB	Aatm dB	Agr dB	Refl. Ant. dB	LAT dB(A)
WEA1	WEA 1 / E-82 Nord	104.4			3.0			953.6			70.6	1.7	2.9		32.2
WEA2	WEA 2 / E-82 Süd	104.0			3.0			1048.7			71.4	1.9	3.1		30.6
GS															34.5

D Grafische Dokumentation der SODAR-RASS-Messungen

D.1 Windprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit

D.2 Scherungsprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit

D.3 Profile der Turbulenzintensität (Höhe über Turbulenz) der horizontalen Windgeschwindigkeit

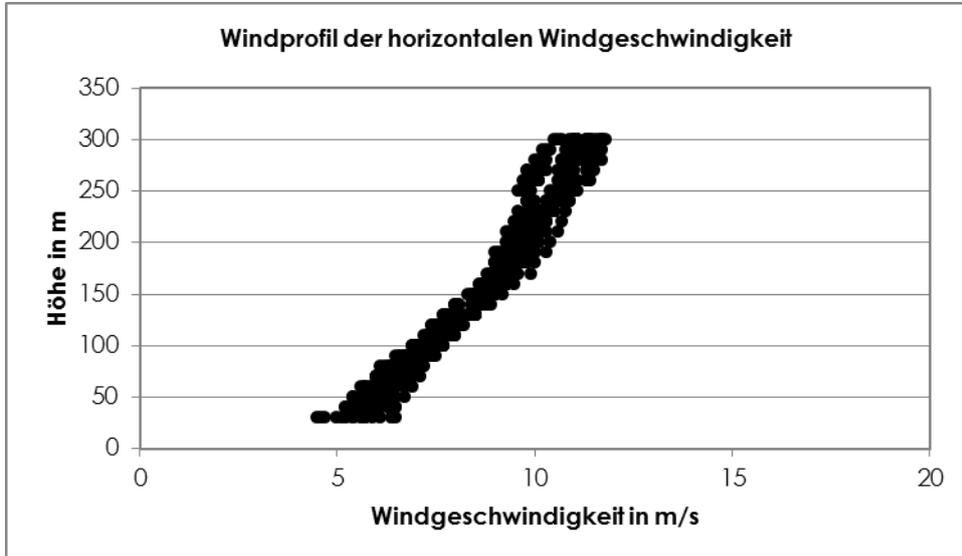
D.4 Profile der Turbulenzintensität (Turbulenz über Höhe) der horizontalen Windgeschwindigkeit

D.5 Profile der vertikalen Temperaturverteilung (Temperatur über Höhe)

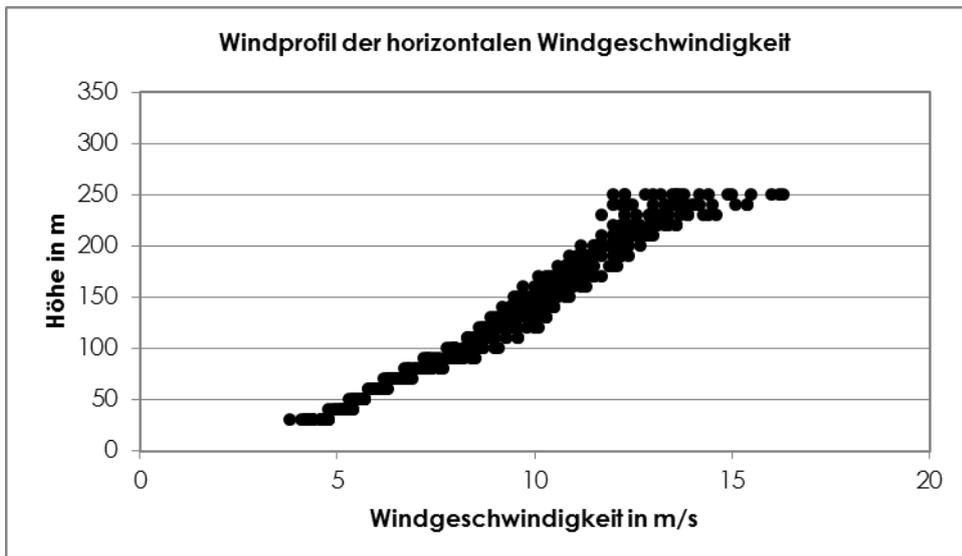


D.1 Windprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit

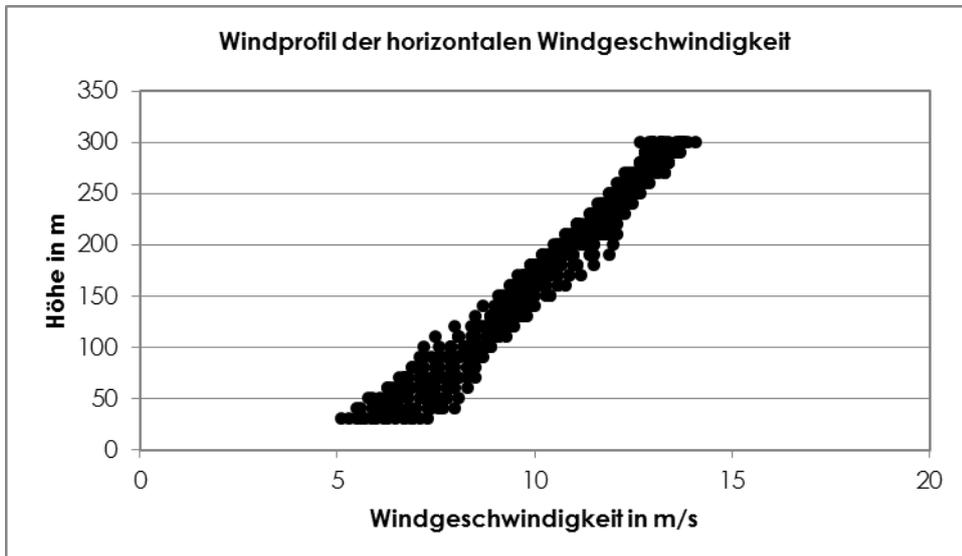
1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



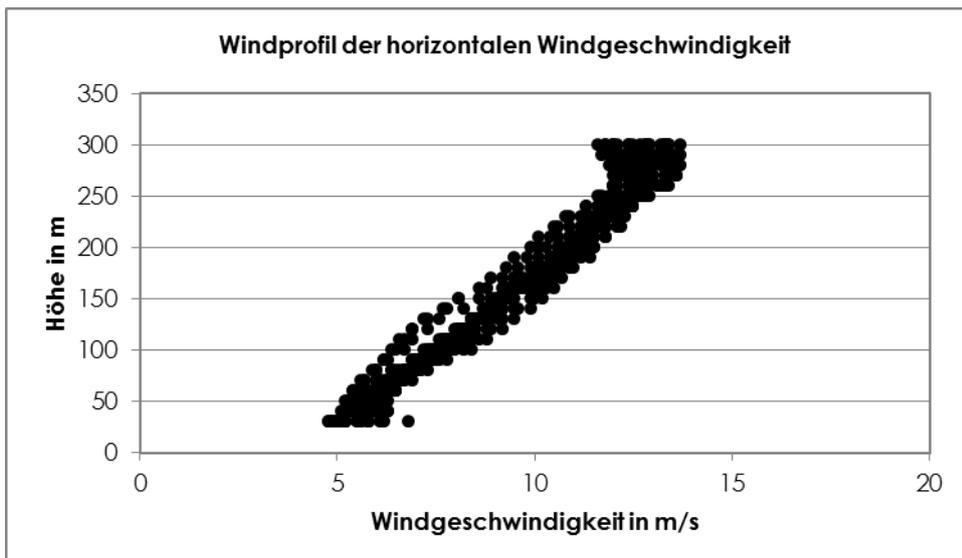
2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



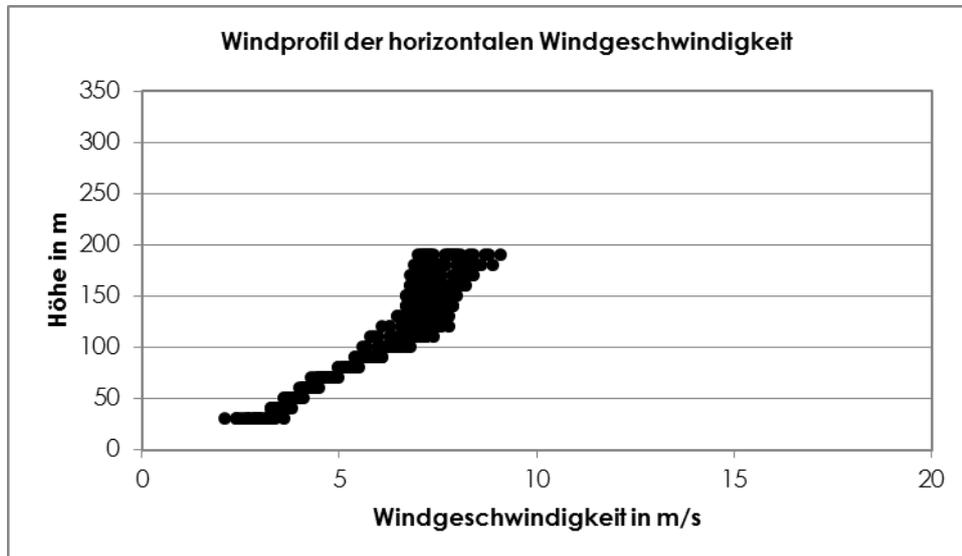
3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr

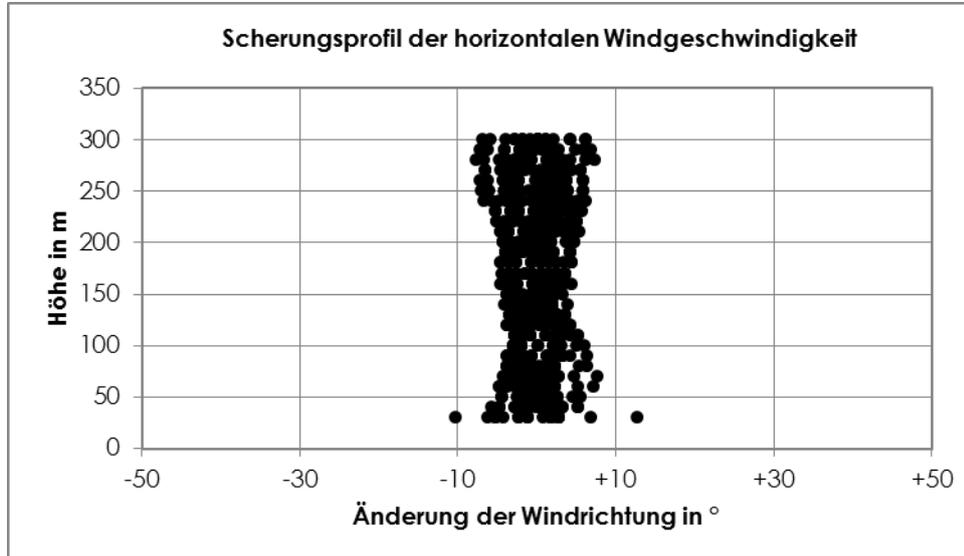


5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr

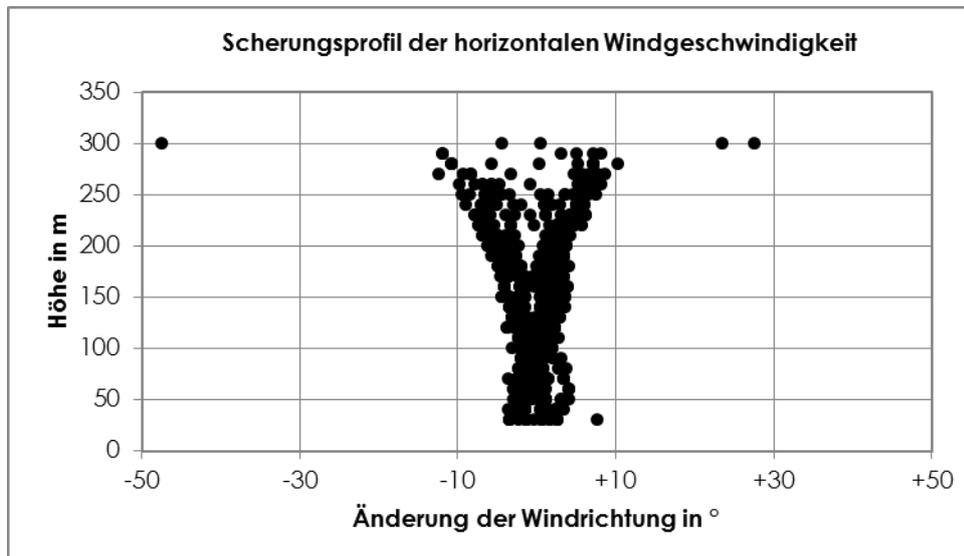


D.2 Scherungsprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit

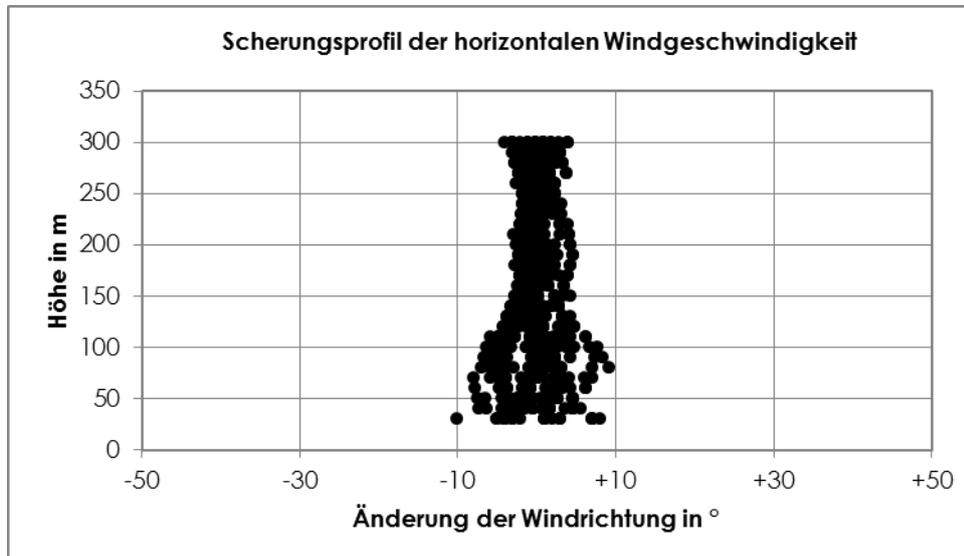
1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



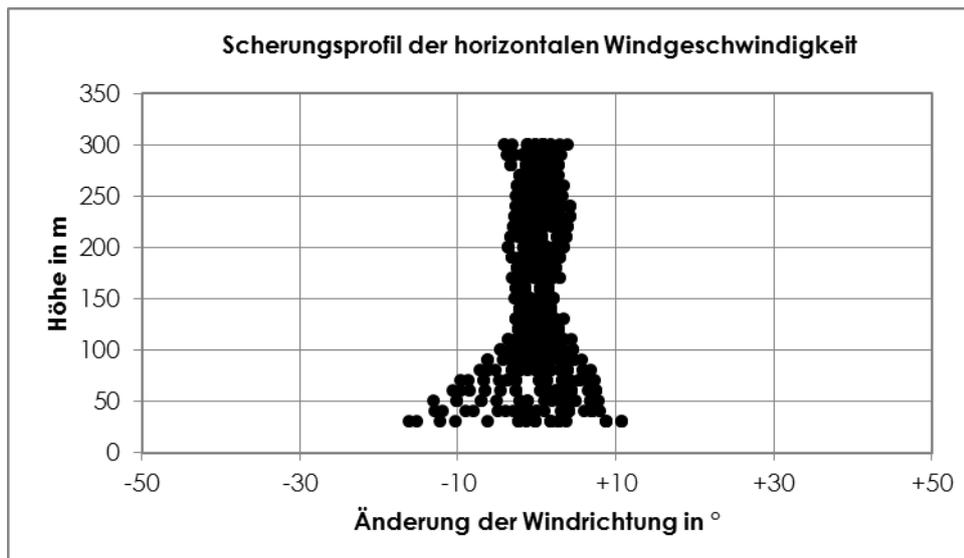
2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



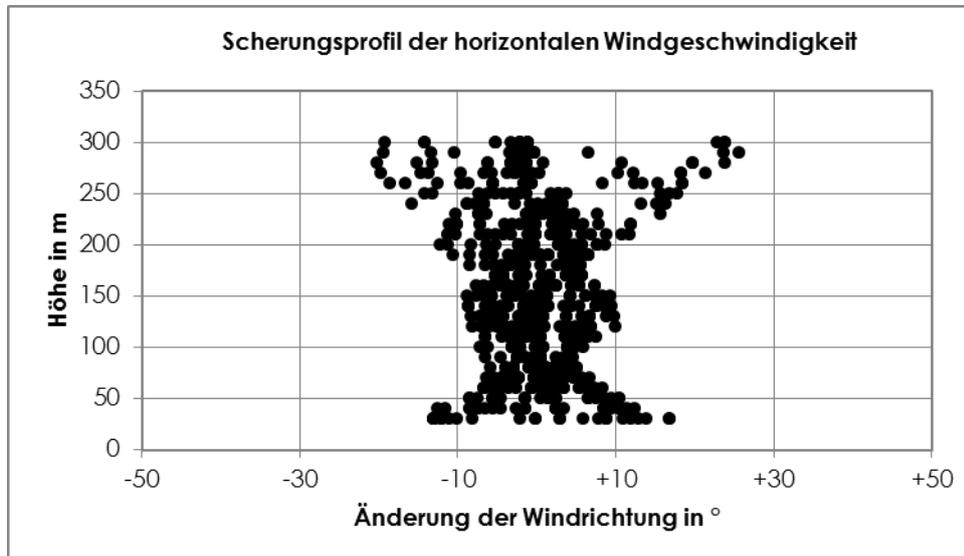
3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr

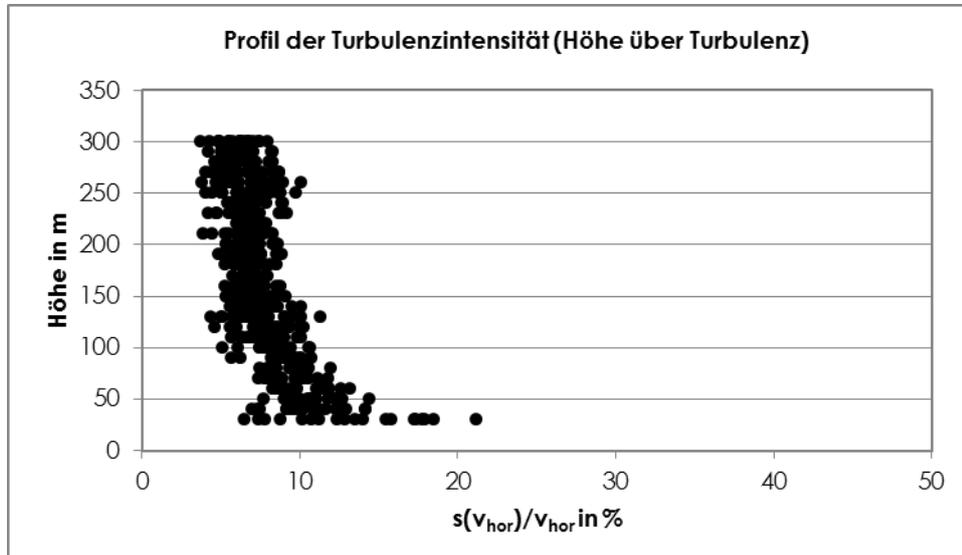


5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr

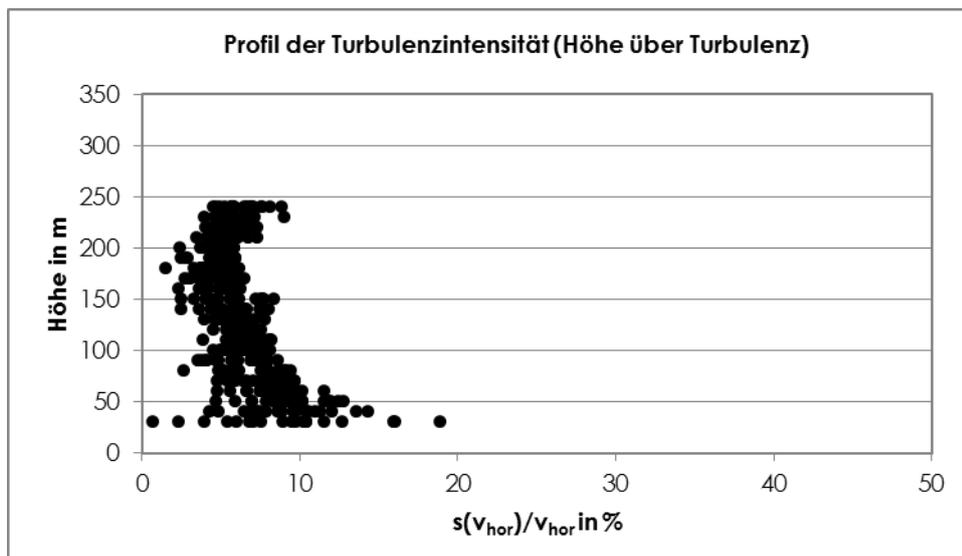


D.3 Profile der Turbulenzintensität (Höhe über Turbulenz) der horizontalen Windgeschwindigkeit

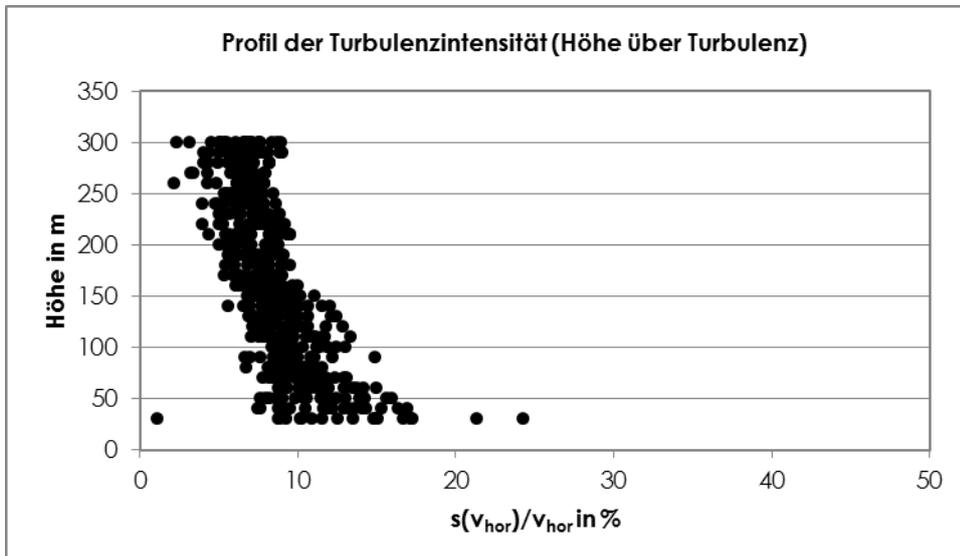
1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



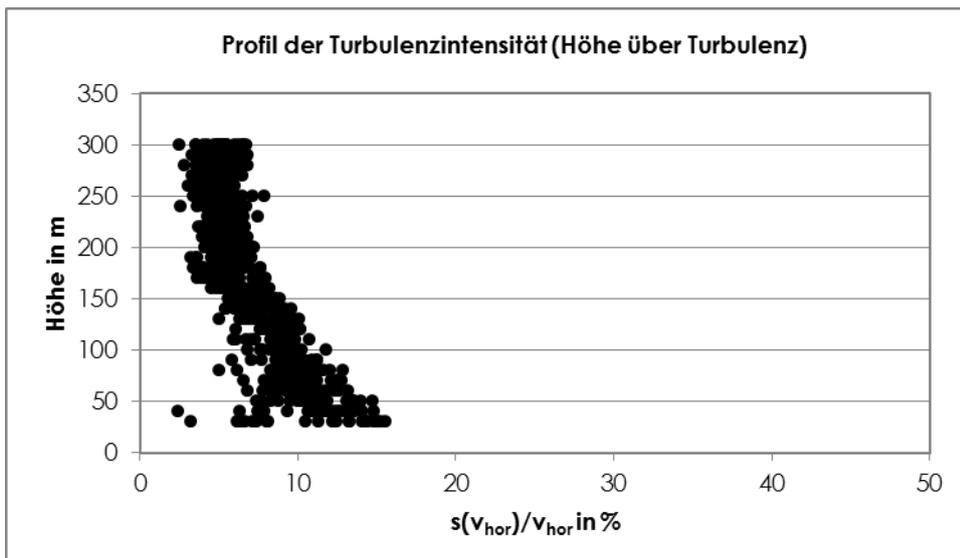
2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



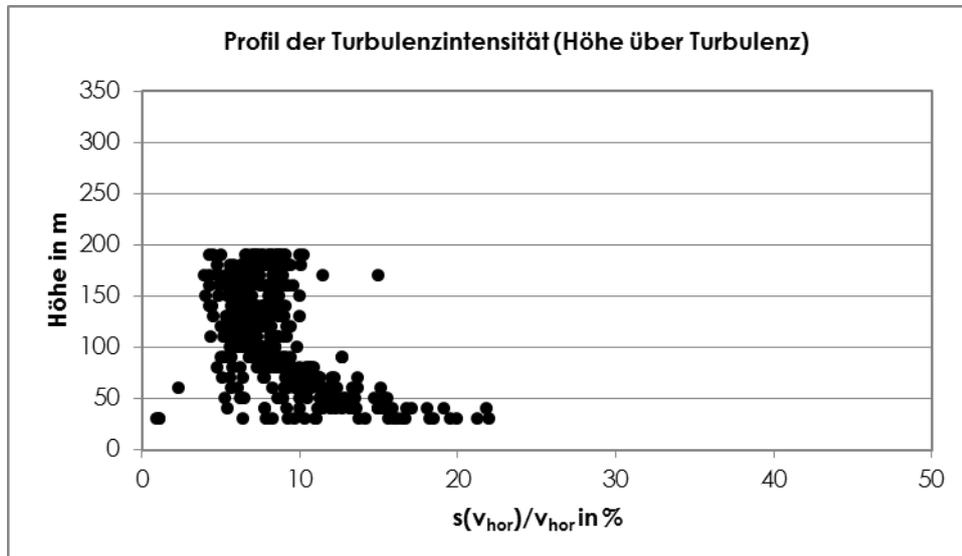
3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr

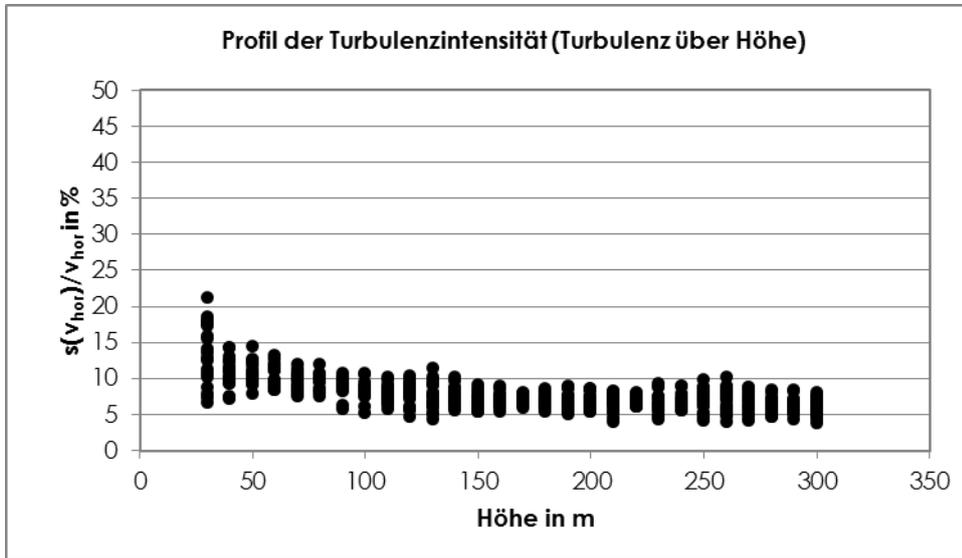


5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr

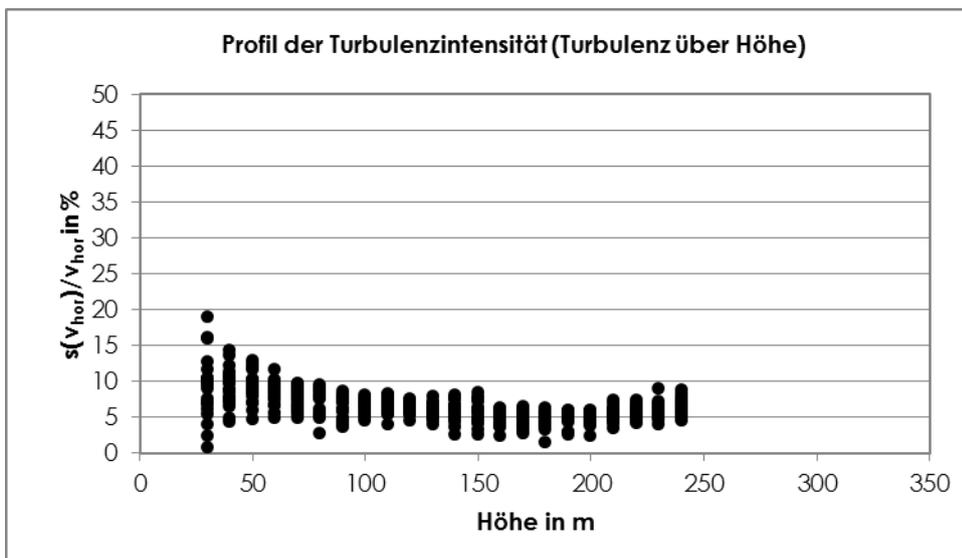


D.4 Profile der Turbulenzintensität (Turbulenz über Höhe) der horizontalen Windgeschwindigkeit

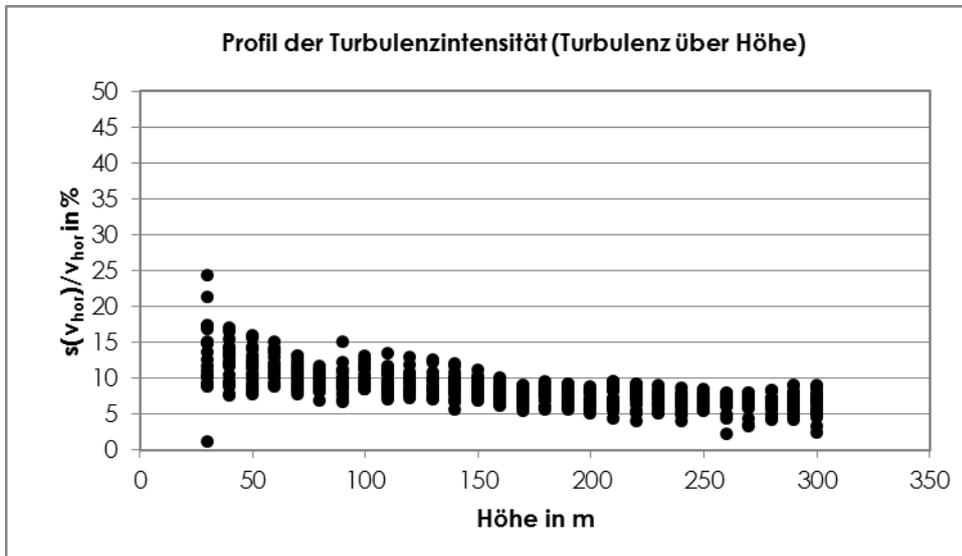
1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



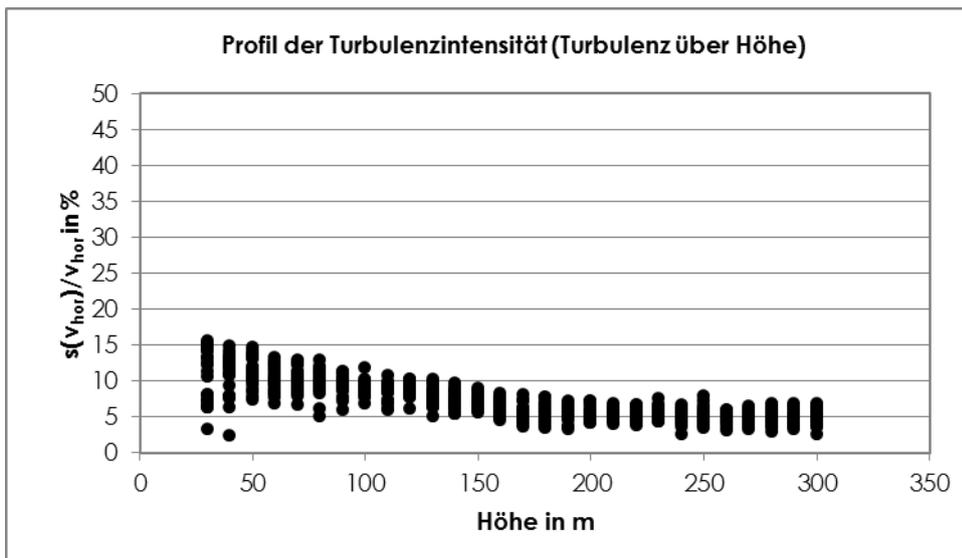
2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



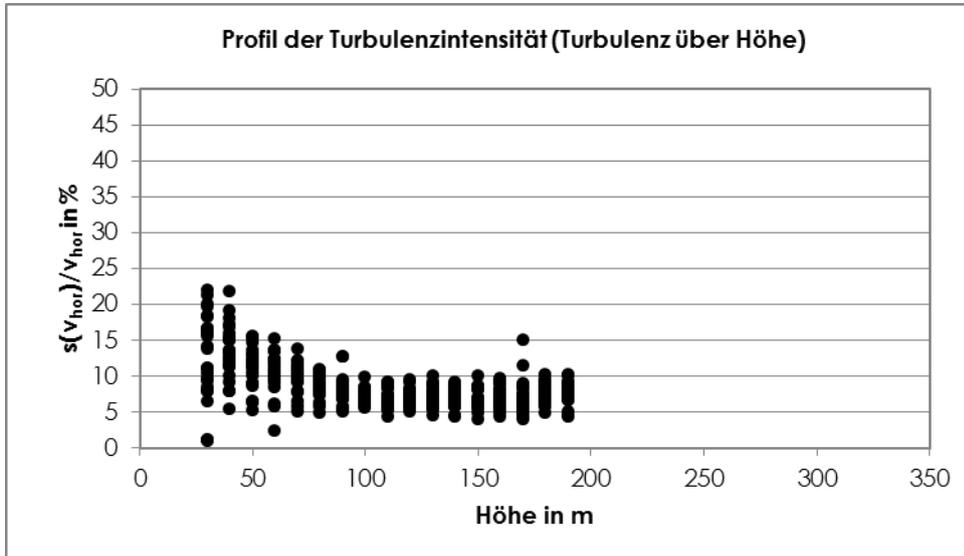
3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr

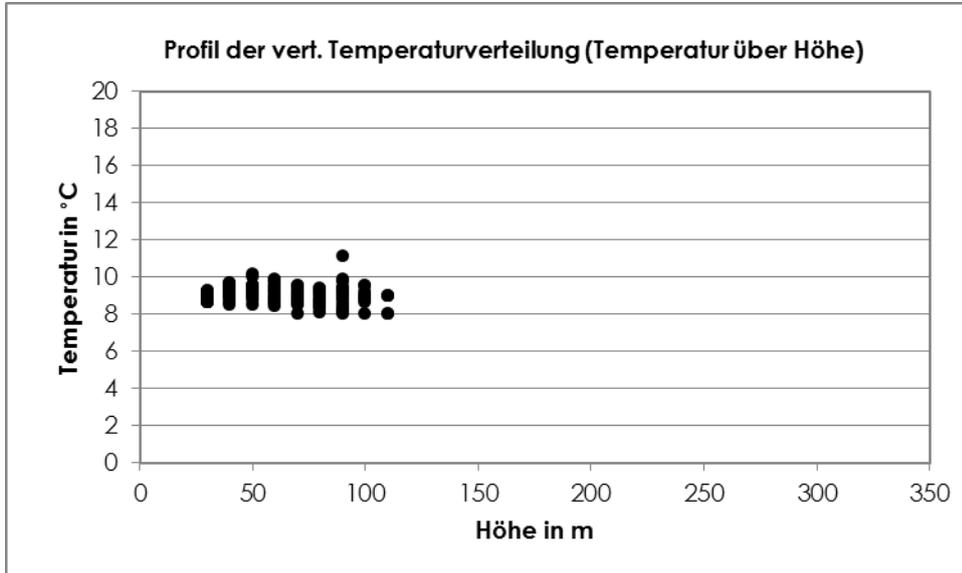


5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr

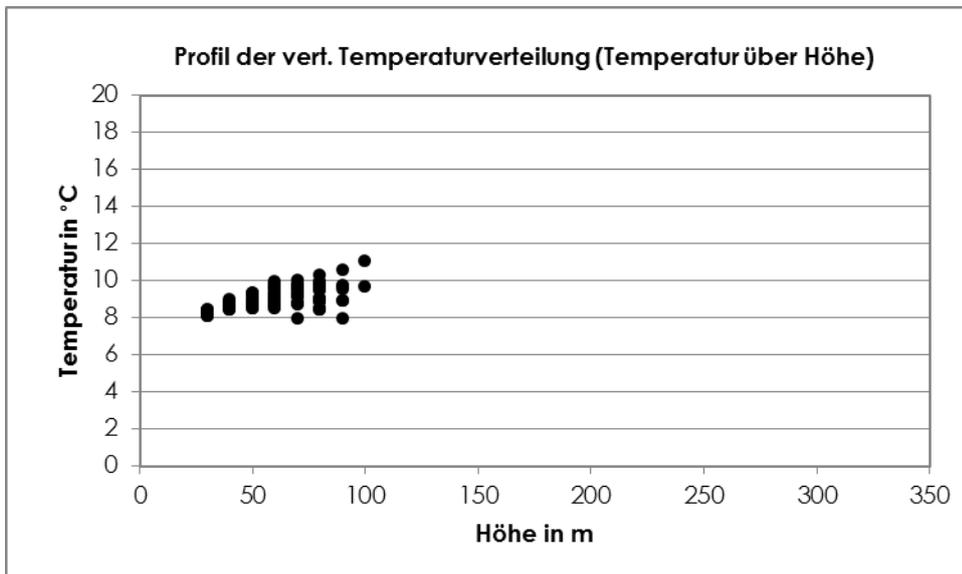


D.5 Profile der vertikalen Temperaturverteilung (Temperatur über Höhe)

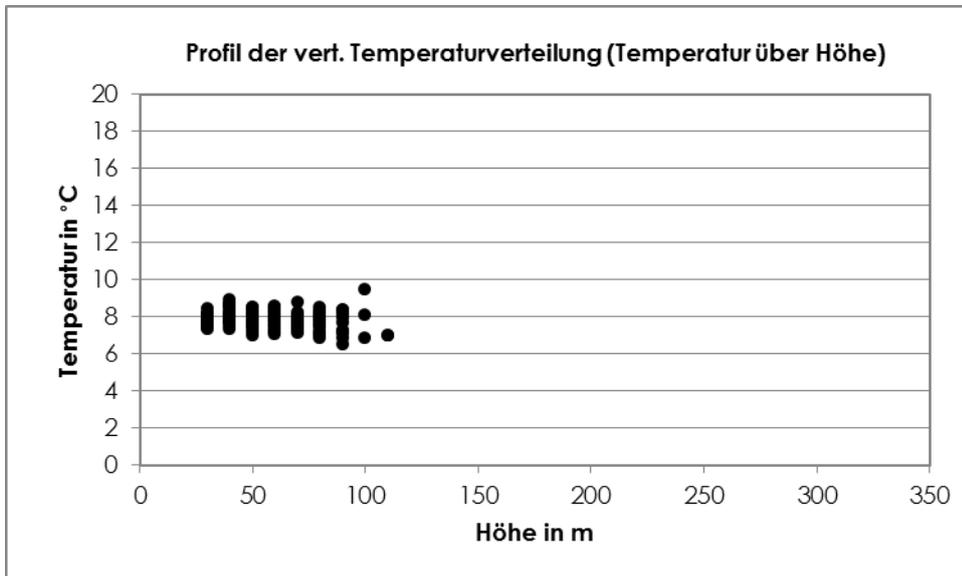
1. Messnacht, 29.10.2013 22:00 Uhr bis 29.10.2013 23:30 Uhr



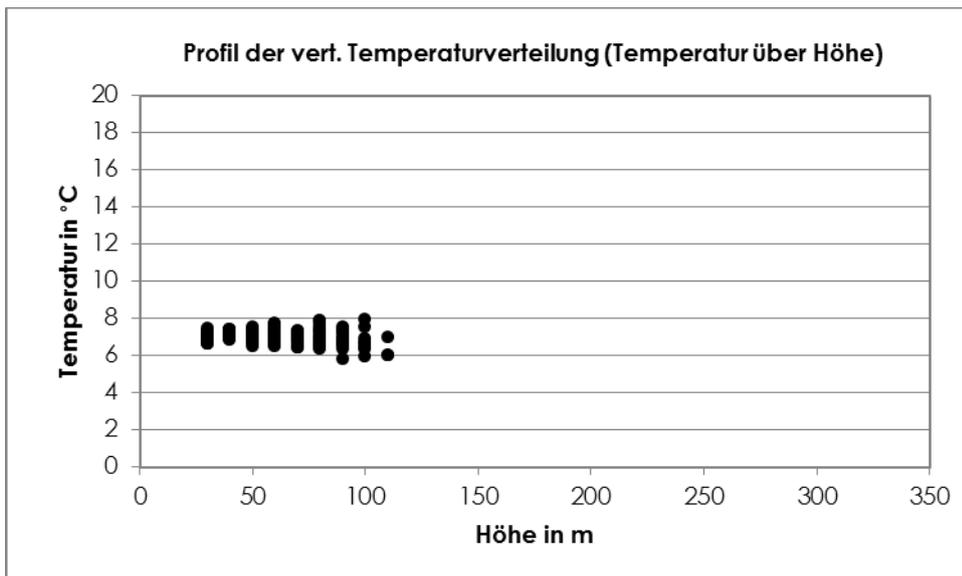
2. Messnacht, 30.10.2013 22:00 Uhr bis 30.10.2013 23:30 Uhr



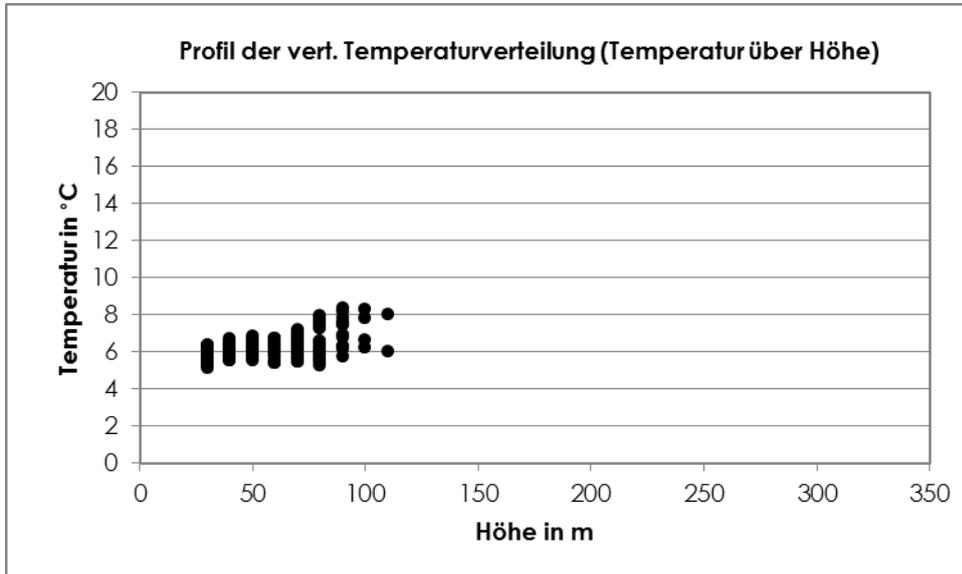
3. Messnacht, 04.11.2013 23:00 Uhr bis 05.11.2013 00:30 Uhr



4. Messnacht, 11.11.2013 22:30 Uhr bis 12.11.2013 00:15 Uhr



5. Messnacht, 13.11.2013 23:00 Uhr bis 14.11.2013 01:00 Uhr



E Digitale Dokumentation

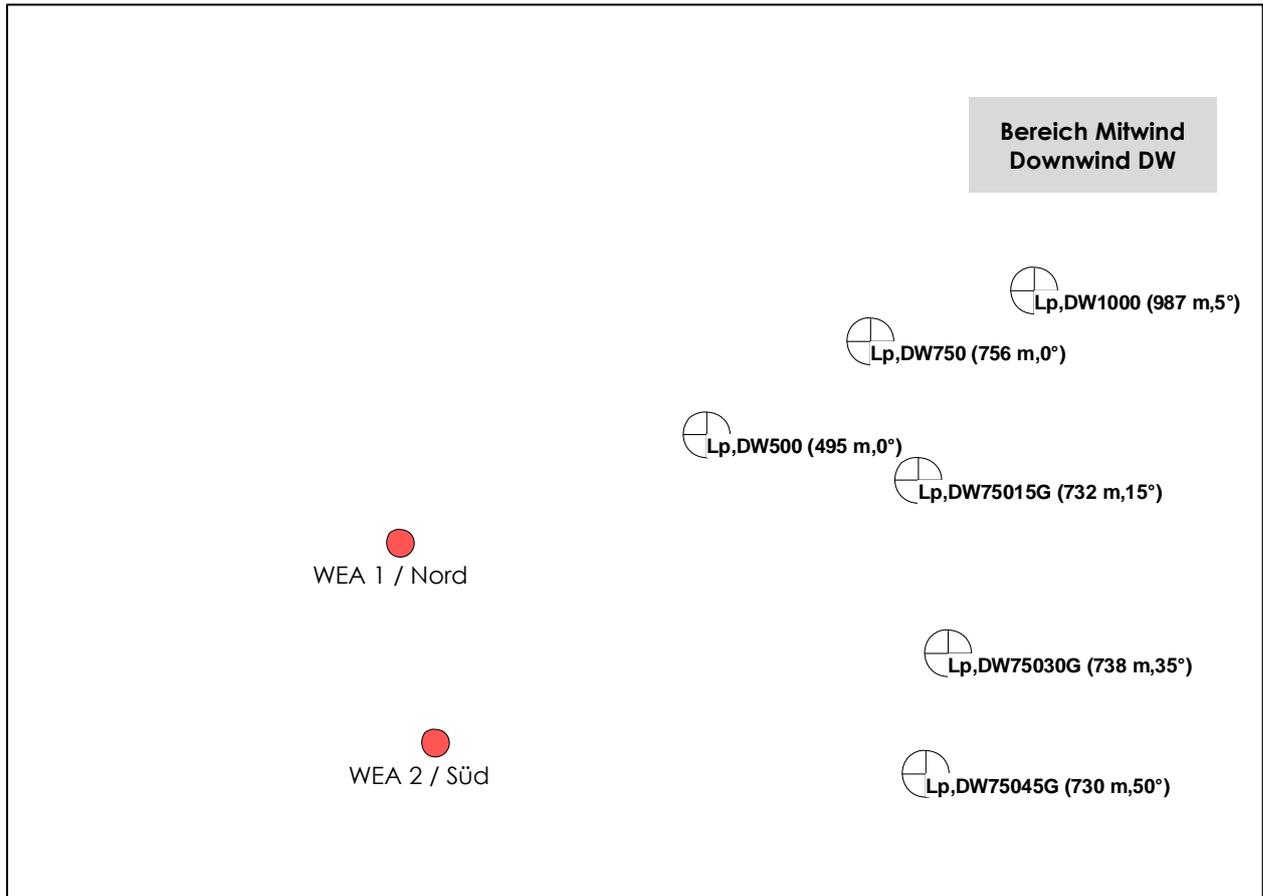
E.1 Berechnungstabellen zu den akustischen und nicht-akustischen Messungen (CD-Rom)

E.2 Vollständiger Messbericht SODAR-RASS-Messungen (CD-Rom)



F Lagepläne



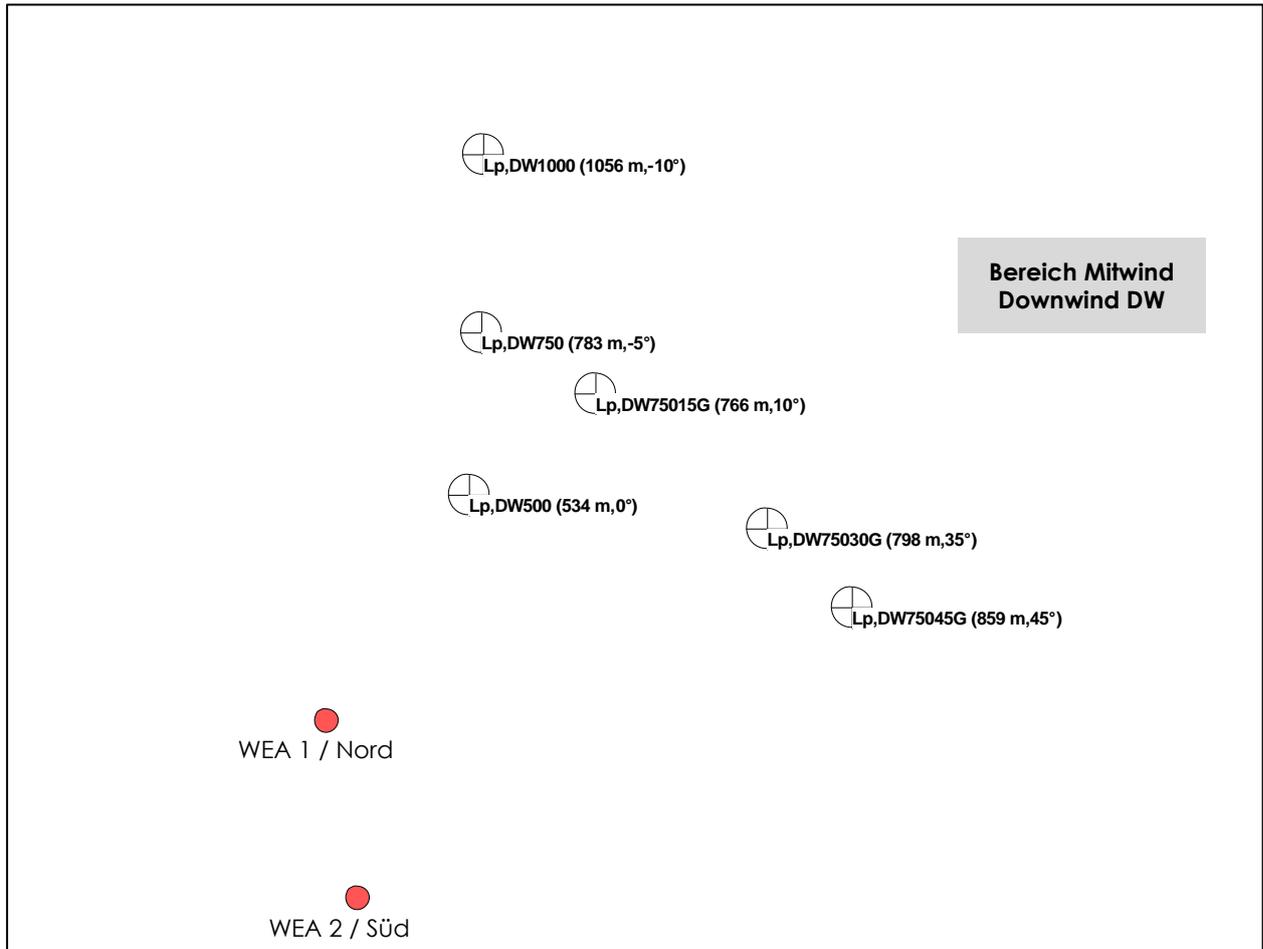


Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)
	1. Messnacht: Ausbreitungsrichtung: 55° Wind aus WSW
IMPDW500	495 / 0
IMPDW750	756 / 0
IMPDW75015G	732 / 15
IMPDW75030G	738 / 35
IMPDW75045G	730 / 50
IMPDW1000	987 / 5

(1) tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Planinhalt: Lageplan	Kommentar: Übersichtslageplan der Messkonstellation in der 1. Messnacht	
Maßstab: ohne		



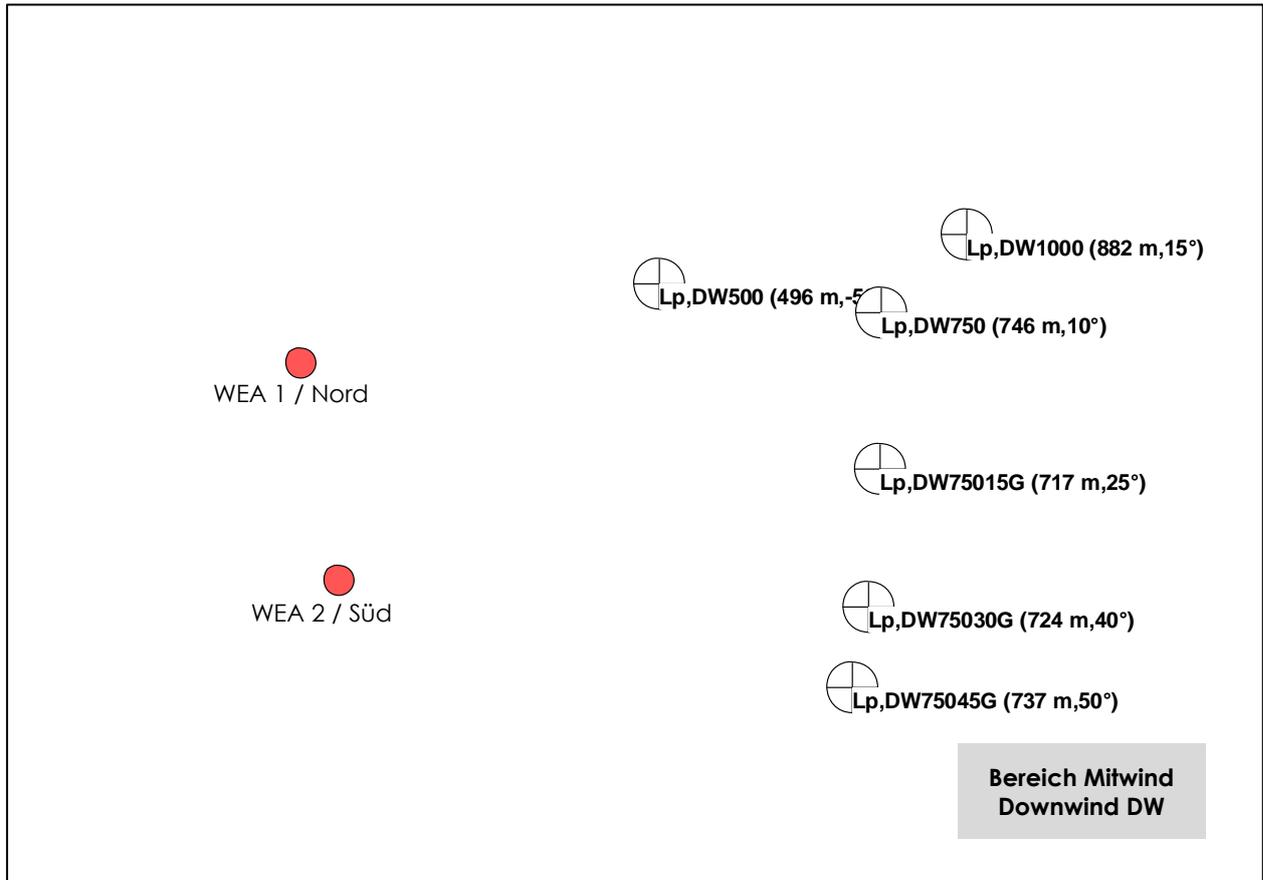


Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)
	2. Messnacht: Ausbreitungsrichtung: 20° Wind aus SSW
IMPDW500	534 / 0
IMPDW750	783 / -5
IMPDW75015G	766 / 10
IMPDW75030G	798 / 35
IMPDW75045G	859 / 45
IMPDW1000	1.056 / -10

(2) tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Planinhalt: Lageplan	Kommentar: Übersichtslageplan der Messkonstellation in der 2. Messnacht	
Maßstab: ohne		



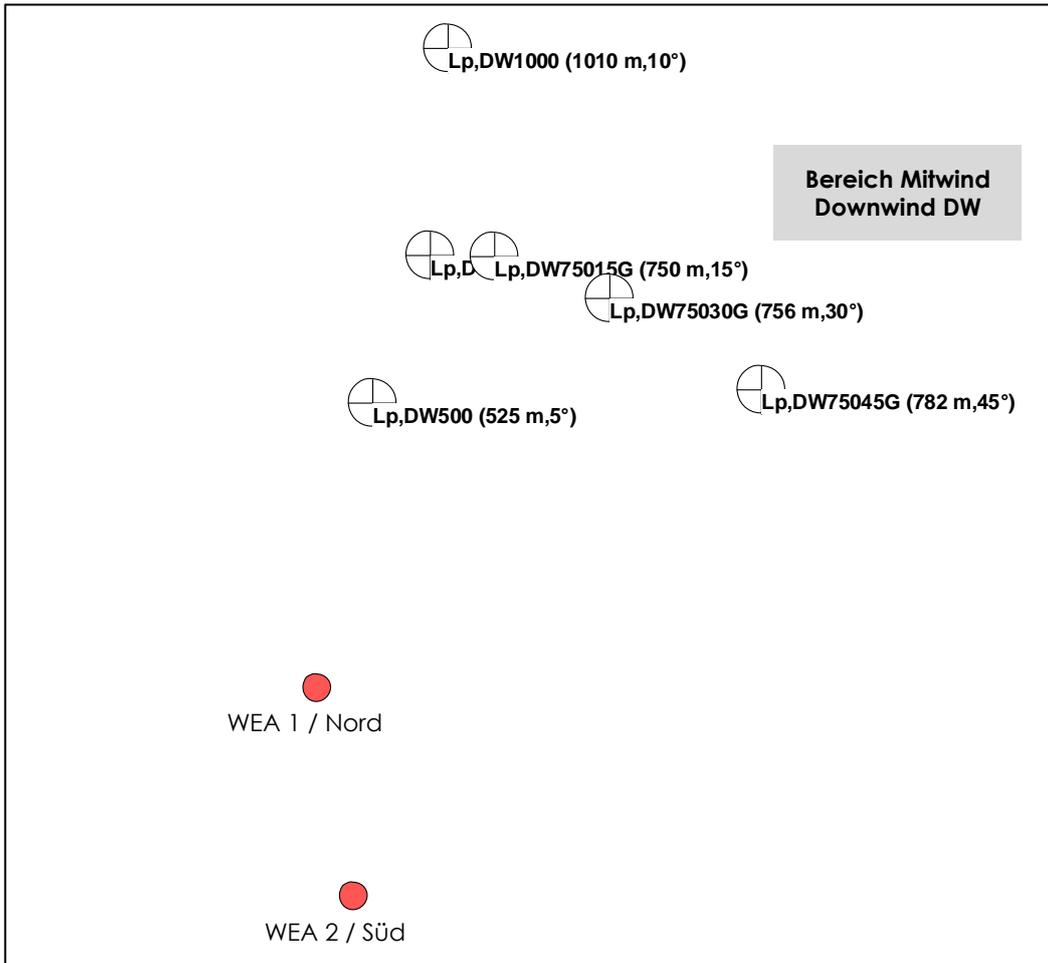


Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)
	3. Messnacht: Ausbreitungsrichtung: 65° Wind aus WSW
IMPDW500	496 / -5
IMPDW750	746 / 10
IMPDW75015G	717 / 25
IMPDW75030G	724 / 40
IMPDW75045G	737 / 50
IMPDW1000	882 / 15

(3) tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Planinhalt: Lageplan	Kommentar: Übersichtslageplan der Messkonstellation in der 3. Messnacht	
Maßstab: ohne		



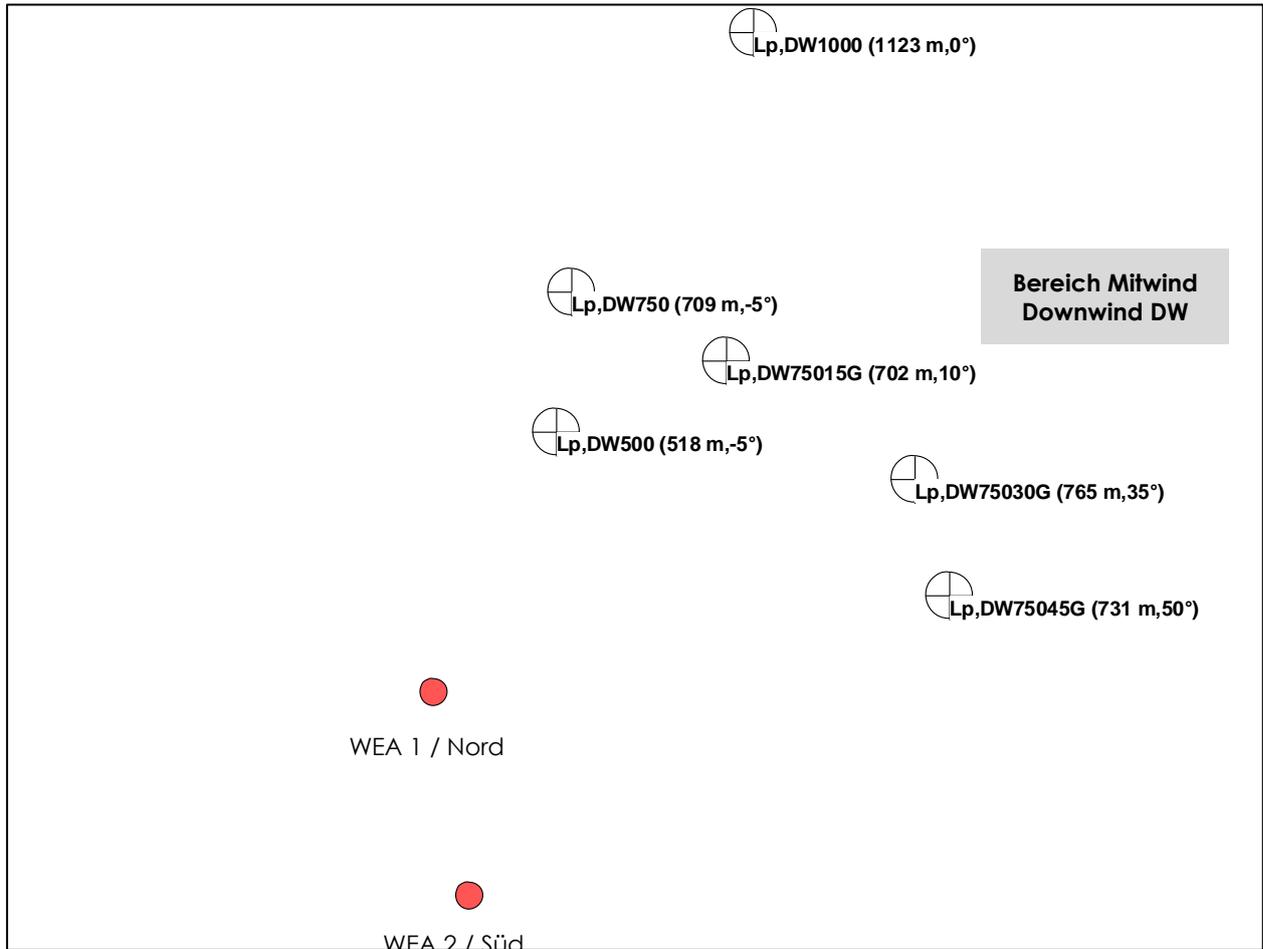


Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)
	4. Messnacht: Ausbreitungsrichtung: 0° Wind aus S
IMPDW500	525 / 5
IMPDW750	732 / 10
IMPDW75015G	750 / 15
IMPDW75030G	756 / 30
IMPDW75045G	782 / 45
IMPDW1000	1.010 / 10

(4) tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Planinhalt: Lageplan	Kommentar: Übersichtslageplan der Messkonstellation in der 4. Messnacht	
Maßstab: ohne		





Immissions-Messpunkt	IMP-MiP ⁽¹⁾ in m / (Winkel gegenüber der Ausbreitungsrichtung in °)
	5. Messnacht: Ausbreitungsrichtung: 20° Wind aus SSW
IMPDW500	518 / -5
IMPDW750	709 / -5
IMPDW75015G	702 / 10
IMPDW75030G	765 / 35
IMPDW75045G	731 / 50
IMPDW1000	1.123 / 0

(5) tatsächlicher horizontaler Abstand zwischen Immissionsmesspunkt und dem geografischen Mittelpunkt der WEA in m

Planinhalt: Lageplan	Kommentar: Übersichtslageplan der Messkonstellation in der 5. Messnacht	
Maßstab: ohne		

